



Mario Bunge

Tratado de Filosofía

Volumen 4

ONTOLOGÍA II:
UN MUNDO DE SISTEMAS

Tratado de Filosofía
Mario Bunge

Mario Bunge
Tratado de filosofía

1
SEMÁNTICA I: *SENTIDO Y REFERENCIA*

2
SEMÁNTICA II: *INTERPRETACIÓN Y VERDAD*

3
ONTOLOGÍA I: *EL MOBLAJE DEL MUNDO*

4
ONTOLOGÍA II: *UN MUNDO DE SISTEMAS*

5
GNOSEOLOGÍA Y METODOLOGÍA I: *EXPLORACIÓN DEL MUNDO*

6
GNOSEOLOGÍA Y METODOLOGÍA II: *EXPLICACIÓN DEL MUNDO*

7
GNOSEOLOGÍA Y METODOLOGÍA III: *FILOSOFÍA DE LA CIENCIA Y DE LA TÉCNICA*

8
ÉTICA: *LO BUENO Y LO JUSTO*

Tratado de Filosofía

Volumen 4

ONTOLOGÍA II: UN MUNDO DE SISTEMAS

Mario Bunge



Traducido de la edición en inglés de *Treatise on Basic Philosophy.* Vol. 4: *Ontology II: A World of Systems.*

Traducción: Rafael González del Solar

Es biólogo (Universidad Nacional de Córdoba, Argentina), doctorando en el Departamento de Filosofía de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) y traductor *freelance* especializado en textos técnicos, científicos y filosóficos. Su formación incluye la investigación de campo en ecología trófica de carnívoros (como becario de CONICET, Argentina) y estudios de filosofía de la ciencia con Mario Bunge (Montreal, 2000), de quien ha traducido otros siete libros. Actualmente es miembro del Grupo de Investigación en Ecología de Comunidades de Desierto (ECODES, Argentina) y del Grupo de Estudios Humanísticos sobre Ciencia y Tecnología (GEHUCT-UAB). En 2004 fue distinguido con una beca de formación de posgrado de la Fundación Carolina (España).

Diseño de cubierta: Departamento de diseño Editorial Gedisa

Primera edición, junio de 2012, Barcelona

Avenida del Tibidabo, 12 (3º)
Tel. 34 93 253 09 04
Fax 34 93 253 09 05
08022 - Barcelona, España
gedisa@gedisa.com
www.gedisa.com

ISBN obra completa: 978-84-9784-202-0
ISBN vol. 4: 978-84-9784-197-9
IBIC: HPJ
Deposito legal:

Impreso en España
Printed in Spain



Esta obra ha sido publicada con una subvención del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, para su préstamo público en Bibliotecas Públicas, de acuerdo con lo previsto en el artículo 37.2 de la Ley de Propiedad Intelectual.

Prefacio general al *Tratado*

Este volumen forma parte de un amplio *Tratado de filosofía*. La obra abarca lo que para el autor constituye el núcleo de la filosofía contemporánea, a saber, la semántica (las teorías del significado y la verdad), la gnoseología (las teorías del conocimiento), la metafísica (teorías generales sobre el mundo) y la ética (teorías de los valores y la acción justa).

La filosofía social, la filosofía política, la filosofía del derecho, la filosofía de la educación, la estética, la filosofía de la religión y otras ramas de la filosofía han quedado excluidas del anterior *quadrivium*,[#] ya sea porque han sido absorbidas por las ciencias del hombre o bien porque se las puede considerar aplicaciones tanto de la filosofía básica como de la lógica. Tampoco se ha incluido esta última en el *Tratado*, aunque es parte tanto de la filosofía como de la matemática. La razón de esta exclusión es que la lógica se ha convertido en una materia tan técnica que únicamente los matemáticos pueden abrigar la esperanza de hacer contribuciones originales a este campo. Aquí sólo hemos tomado prestada la lógica que nos es útil.

La filosofía expuesta en el *Tratado* es sistemática y, en alguna medida, también exacta y científica. En otras palabras, las teorías filosóficas

[#] Hemos dejado sin traducir aquellas expresiones en idiomas diferentes del inglés que, como el vocablo latino *quadrivium* o el término francés *bête noire*, entre otras, son de uso lo bastante frecuente en la comunidad de habla castellana como para representar un problema para el lector de esta obra. [N. del T.]

formuladas en estos volúmenes (*a*) están formuladas en determinados lenguaje exactos (matemáticos) y (*b*) de ellas se espera que sean consistentes con la ciencia contemporánea.

Ahora unas palabras a modo de disculpa por esta tentativa de construir un sistema filosófico. Dado que vivimos en la era del análisis, uno bien podría preguntarse si todavía hay sitio –fuera de los cementerios de ideas– para la síntesis filosófica. La opinión del autor es que el análisis –aunque necesario– resulta insuficiente, excepto, claro, para la destrucción. La finalidad última de la investigación teórica, ya sea en filosofía, ciencia o matemática, es la construcción de sistemas, vale decir, de teorías. Más aún, esas teorías deben estar articuladas en sistemas en lugar de estar aisladas y, mucho menos, ser mutuamente incompatibles.

Una vez que tenemos un sistema, podemos pasar a desmontarlo. Primero el árbol, después el serrín. Y una vez alcanzada la etapa del serrín, hemos de pasar a la siguiente, a saber, la construcción de nuevos sistemas. Hay tres razones para ello: porque el universo es, él mismo, sistémico; porque ninguna idea puede tornarse completamente clara, a menos que se halle incluida en algún sistema y porque la filosofía del serrín es bastante aburrida.

El autor dedica esta obra a su profesor de filosofía

KANENAS T. POTA

como agradecimiento por su consejo: «Haz tu propio intento. Tu recompensa será hacerlo, tu castigo haberlo hecho».

Índice de *Ontología II*



Prefacio a *Ontología II*

Este volumen continúa y finaliza la tarea comenzada en la Parte I, titulada *El moblaje del mundo*, a saber la construcción de una ontología exacta y sistemática, congruente con la ciencia contemporánea. Sin embargo, quien esté dispuesto a dar por sentadas las nociones básicas analizadas y sistematizadas en el volumen anterior –las de sustancia, propiedad, cosa, posibilidad, cambio, espacio y tiempo– puede leer éste de forma independiente.

Los tres temas principales del libro son la totalidad (o sistemicidad), la variedad y el cambio. Se analizan y sistematizan estas tres nociones que aparecen en algunos de los principales supuestos de nuestra ontología. Una de esas hipótesis es que el universo no es un montón de cosas sino una cosa compuesta de cosas interconectadas, vale decir, un sistema. Este supersistema se compone de subsistemas de diferentes clases: físicos, biológicos y sociales, entre otros. Los sistemas físicos son los únicos que pueden estar compuestos por cosas que no son sistemas, tales como partículas elementales y cuantos de campo. Sin embargo, aun las cosas que no constituyen sistemas son componentes de algún sistema, además de lo cual todo sistema, con excepción del universo, es un subsistema de algún sistema: no existen cosas aisladas. El nuestro es, en resumidas cuentas, un universo de cosas interconectadas. Es, además, el único que existe.

Otro postulado de este sistema ontológico es que los sistemas concretos no son todos iguales, salvo en el sentido de que son sistemas y, por ende, se los puede estudiar con ayuda de un marco teórico sistémico unificador. Hay diversas clases de sistemas y cada una de ellas se caracteriza por las propiedades y leyes que le son peculiares. Sin duda, en ocasiones conseguimos dar cuenta de la emergencia y la historia de un

sistema en términos de su composición, entorno [o ambiente] y estructura. No obstante, una explicación no tiene por qué ser «eliminativa»: la sistemicidad, la emergencia y la novedad cualitativa son tan genuinas como pasibles de ser explicadas. La totalidad y la emergencia distan de ser incompatibles con la razón: se las puede comprender.

La tercera gran tesis de esta obra es que ningún sistema, con excepción del universo como totalidad, perdura eternamente. Los sistemas se ensamblan, cambian y se descomponen. Si son naturales, emergen como resultado de procesos de autoorganización, a menudo a partir de los residuos provenientes de la descomposición de otros sistemas. Hasta los modestos procesos de acreción pueden dar como resultado sistemas con propiedades emergentes. En consecuencia, el orden puede surgir a partir del azar, los sistemas a partir de precursores físicos, los sistemas vivientes a partir de otros no vivientes y así sucesivamente. (En los sistemas abiertos el aumento de la entropía no es necesario).

En la actualidad, estas tres tesis son o casi son de conocimiento común. Junto con muchas otras, se han tornado parte esencial de un sistema ontológico orientado a la ciencia y expresado en un lenguaje bastante exacto. En consecuencia, la novedad de nuestro sistema radica algunas veces en sus componentes y, otras, en su organización.

Este volumen comprende los siguientes temas. El Capítulo 1 define las nociones de sistema y subsistema, así como las de emergencia y nivel, además de lo cual establece un puñado de leyes que, según suponemos, comparten los sistemas de toda clase. El Capítulo 2 define las nociones de sistema químico y sistema bioquímico, que consideramos emergentes relativamente al nivel físico. El Capítulo 3 intenta capturar la elusiva noción de vida y aborda los problemas de biovalor, salud, adaptación y bioprogreso. El Capítulo 4 está dedicado al problema mente-cuerpo, desde un punto de vista que combina la perspectiva sistémica con el enfoque psicobiológico. (Las neuronas individuales no pueden pensar, pero ciertos sistemas de neuronas, si están conectados de maneras plásticas especiales, sí pueden hacerlo). El Capítulo 5 define el concepto de sociosistema y ofrece un análisis de toda sociedad en el que se distinguen cuatro subsistemas principales: el sistema de parentesco, la economía, la cultura y la organización política. El Capítulo 6 presenta la cosmovisión que surge de los capítulos precedentes, la cual es naturalista (pero no fisicalista), sistémica (pero no holística), pluralista (con respecto a las propiedades, pero no a la sustancia) y dinamista. Por último, los dos

apéndices ofrecen un repaso de algunos modelos matemáticos de los sistemas y del cambio que, a causa de su generalidad, pertenecen tanto a la ontología, como a la ciencia. Aunque no esenciales para ello, ambos apéndices resultan útiles para comprender el texto.



Agradecimientos

Agradezco los consejos y críticas ofrecidos por los profesores Lina Betucci (Departamento de Biología, Universidad Autónoma Metropolitana, México), Ernesto M. Bravo (Instituto Superior de Medicina, La Habana), A. Brito da Cunha (Instituto de Biociencias, Universidade de São Paulo), Sir Francis Crick (The Salk Institute), Bernardo Dubrovsky (Department of Psychiatry, McGill University), Máximo García-Sucre (Sección de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas), Bernd Küpers (Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie, Göttingen), Rodolfo Llinás (Department of Physiology and Biophysics, New York University Medical Center), Roger Palfree (Department of Biology, McGill University), Rafael Pérez Pascual (Instituto de Física, Universidad Autónoma de México), Osvaldo Reig (Departamento de Estudios Ambientales, Universidad Simón Bolívar, Caracas), Daniel Seni (Institut d'Urbanisme, Université de Montréal) y René Zayan (Centre de psychologie expérimentale et comparée, Université de Louvain). También estoy en deuda con mi antiguo ayudante de investigación, Robert Blohm, por proponerme varias correcciones. Mis antiguos alumnos David Conter, Adolfo García de la Sienra, Gordon Graham y John Hawthorne hicieron diversos comentarios, por los cuales les estoy agradecido. Agradezco también al Dr. Ricardo Peralta Fabi por confeccionar todos los diagramas del libro. Por último, pero no por ello menos importante, agradezco a los profesores D. R. Axelrad y Walter Hitschfeld, así

como al Canada Council y McGill Faculty of Graduate Studies and Research, por apoyar mi investigación.

Mario Bunge

Prólogo del autor a la edición española[#]

La filosofía se ha desarrollado vigorosamente en España y en Hispanoamérica en el curso de las últimas décadas. Se ha desarrollado al punto de que ya tenemos poco que aprender de la filosofía alemana, la que aún se está recuperando del desastre de 1933, y menos todavía de la filosofía francesa, que desde hace más de un siglo se arrastra a la zaga de la retaguardia alemana.

Francisco Romero, el filósofo argentino de origen español, decía con razón que en todos los pueblos la filosofía pasa por tres etapas: la adhesión entusiasta y dogmática a una escuela, el estudio crítico de la filosofía toda y la creación original. Creo que algunos países de habla española están pasando de la segunda etapa a la tercera.

Es verdad que aún se importan, habitualmente con retraso, modas filosóficas europeas. (La diferencia es que hoy se copia a Oxford o a París, en lugar de Friburgo). También es cierto que la mayoría de los estudios filosóficos son de carácter apologético o crítico. Pero ya hay un comienzo bien claro de investigación original en áreas de la filosofía que hace un par de décadas solíamos evitar o incluso ignorar. Entre ellas se destacan la lógica matemática y la semántica formal, la teoría del conocimiento y la epistemología, la ontología seria y la axiología, así como la ética y la filosofía de la técnica.

En nuestros países hay literalmente miles de profesores de filosofía y algunas decenas de investigadores originales. Muchos de ellos están al día en la literatura filosófica internacional y algunos escriben libros

[#] Original en castellano. [N. del T.]

o artículos que contienen aportes nuevos a la filosofía. Hay diversas sociedades nacionales de filosofía y docenas de revistas filosóficas, algunas de ellas bilingües o aun trilingües, entre ellas por lo menos seis de buen nivel. También hay congresos nacionales e internacionales de filosofía.

Todos éstos son hechos nuevos ocurridos en el curso de las últimas décadas. Ellos nos permiten afirmar no sólo que hay filosofía en España y en Hispanoamérica, sino que hay hoy una filosofía hispanoamericana original no menos importante que la alemana, la italiana o la francesa. Esta novedad es motivo de legítimo orgullo para todos quienes, de una manera u otra, han contribuido a construir esta filosofía y, muy particularmente, para quienes lo han hecho en condiciones materiales y políticas difíciles.

Pero la existencia de una vigorosa filosofía hispanoamericana no debiera ser motivo de complacencia. Primero, porque no está sino en los comienzos de la etapa creadora. Segundo, porque la filosofía es una planta muy delicada, que no prospera sino al aire libre, el que a menudo escasea en nuestros países.

Me alegra sobremanera que la prestigiosa Editorial GEDISA haya decidido publicar una versión castellana de mi *Tratado*. Y me honra el que Rafael González del Solar, joven ecólogo y filósofo que ya tradujo siete de mis libros, haya aceptado ocuparse de esta tarea, tan pesada como delicada. Finalmente, he aprovechado esta ocasión para corregir algunos errores que aparecen en la edición original.

MARIO BUNGE

Símbolos especiales

$\varnothing$	el *conjunto vacío*
$a \in A$	el individuo *a pertenece* al conjunto *A*
$A \subset B$	el conjunto *A está incluido* en el conjunto *B*
$A \cup B$	el conjunto de objetos de *A o* de *B*
$A \cap B$	el conjunto de objetos de *A y* de *B*
$A - B$	el conjunto de objetos *de A pero no de B*
$A \Delta B$	el conjunto de objetos de *A* o de *B*, pero *no de ambos*
$\langle a, b\rangle$	el *par ordenado* de *a* y *b*
$A \times B$	el *producto cartesiano* de *A* y *B*
$\lvert A \rvert$	la *cardinalidad* (numerosidad) de *A*
$a \dotplus b$	la *asociación* de las cosas *a* y *b* = *sup* {*a*, *b*}
$\mathscr{C}(x)$	la *composición* del sistema *x*
$\mathscr{E}(x)$	el *entorno* del sistema *x*
$\mathscr{S}(x)$	la *estructura* del sistema *x*
$f : A \rightarrow B$	la *función f aplica* el conjunto *A* en el conjunto *B*
$f(x)$	el *valor* de la función *f* en *x*
$\mathbb{F} = \langle F_1, F_2, \ldots, F_n \ldots\rangle$	*función de estado* de un sistema
$h(x, \tau)$	la *historia* de la cosa *x* durante el intervalo temporal τ
sii	*si y sólo si* (condición necesaria y suficiente)
$\mathbb{L}(x)$	el *conjunto de leyes* de la cosa x
$\mathbb{N}$	el conjunto de los *números naturales*
$x \sqsubset y$	la cosa *x* es *parte* de la cosa *y*
$x \prec y$	el sistema *x* es un *subsistema* del sistema *y*

2^S	el *conjunto potencia* (familia de subconjuntos) del conjunto *S*
Pr	función *de probabilidad*
$\mathbb{R}$	la *recta real*
$\mathbb{R}^+$	el conjunto de los *números reales no negativos*
$S_{\mathbb{L}}(x)$	*espacio de estados legal* de la cosa *x*
T	el conjunto de *instantes*

Capítulo 1

Los sistemas

Todas las ciencias estudian sistemas de alguna clase, ya sean naturales (físicos, químicos, biológicos o sociales) o artificiales (técnicos). Además, la mayoría de las ciencias no estudia otra cosa que sistemas. Así pues, la biología estudia biosistemas, la sociología sociosistemas y la tecnología tecnosistemas. La física parece ser la única ciencia que no investiga únicamente sistemas, tales como los átomos y los campos de gran escala, sino también cosas supuestamente simples o elementales, tales como los electrones y los fotones. Aun así, los físicos admiten que cada una de estas cosas básicas es un componente de algún sistema.

Hasta hace poco, cada especie de sistema se estudiaba de forma separada. Unos cuarenta años atrás, diversos especialistas unieron esfuerzos para iniciar diferentes empresas transdisciplinarias, tales como la investigación operativa y la cibernética. Su éxito sugirió a algunos investigadores que era posible un enfoque unificado de problemas pertenecientes a distintos campos de investigación. Señalaban (*a*) que hay algunos conceptos y principios estructurales que parecen ser tener validez para los sistemas de diferentes clases y (*b*) que hay ciertas estrategias de modelización –en particular el enfoque del espacio de estados– que parecen funcionar en todas partes.

A la disciplina que intenta desarrollar este enfoque unificado se le llama con frecuencia 'teoría general de sistemas' (Bertalanffy, 1950, 1958; Boulding, 1956). Paradójicamente, no se trata de una única teoría, sino de todo un conjunto de teorías –la teoría de autómatas, la teoría de

sistemas lineales, la teoría del control, la teoría de redes y la dinámica general lagrangiana, entre otras– unificadas por un marco filosófico (Bunge, 1974c, 1977c). Llamaremos *sistémica* a este conjunto de teorías que se ocupan centralmente de las características estructurales de los sistemas y que, en consecuencia, pueden atravesar las barreras, en gran medida artificiales, erigidas entre disciplinas.

La sistémica posee dos motivaciones relacionadas entre sí, una cognitiva y otra práctica. El motivo cognitivo o teórico es, desde luego, el deseo de descubrir las semejanzas entre los sistemas de toda clase, a pesar de sus diferencias específicas; por ejemplo, entre los sistemas de control de la temperatura corporal y los termostatos de los hornos. La motivación práctica de la sistémica es la necesidad de tratar con los inmensos y polifacéticos sistemas característicos de las sociedades industriales, tales como las redes de comunicación, las fábricas, los hospitales y los ejércitos. Esta complejidad, especialmente la variedad de los componentes de estos sistemas, transgrede las fronteras tradicionales entre disciplinas y exige un enfoque transdisciplinario.

Adviértanse las diferencias entre el científico, el ingeniero y el científico social corrientes, por un lado, y los «especialistas» (en realidad, generalistas) en sistemas por el otro. Mientras que los primeros hacen o aplican una ciencia en particular, los expertos en sistémica reducen el hincapié en la física (la química, la biología o la sociología) de sus sistemas y se ocupan especialmente de su estructura y su comportamiento. Además, están particularmente interesados en la duplicación o imitación (modelización o simulación) del comportamiento de un sistema dado (por caso, una persona), por otro sistema de diferente clase (por ejemplo, un autómata que reconozca ciertas regularidades). Esto no vale solamente para el matemático que considera la sistémica un noble pretexto que le permite jugar con estructuras abstractas, pero que no tiene ninguna preocupación seria por los problemas prácticos de ingeniería o gestión: también vale para el sistemista cuyo propósito es resolver problemas prácticos, tales como modelizar y simular un sistema de campos de pastoreo o una universidad.

El método utilizado por los sistemistas consiste en la modelización matemática junto con la comprobación experimental (o, al menos, por ordenador) de los modelos de los diferentes sistemas. Desde luego, ambas son parte del método científico. Lo que resulta peculiar del modo en que procede el experto en sistemas es que en lugar de incorporar

leyes específicas (por ejemplo, químicas) en su modelo, su objetivo es construir un modelo de caja negra, uno de caja gris o uno cinemático sin los detalles atinentes a la composición material del sistema, y que sea lo bastante general como para abarcar algunos de los aspectos globales de la organización y el comportamiento del sistema en algunos de sus niveles. En consecuencia, el método científico se da por sentado: el hincapié se pone en el enfoque general o transdisciplinario en contraste con el específico o disciplinario. En otras palabras, el experto en sistémica es un todoterreno, casi un filósofo o un filósofo con todas las de la ley.

La sistémica no es lo mismo que el *análisis de sistemas*, una cosa muy publicitada, mal definida y, en ocasiones, controvertida. Cuando es serio, el análisis de sistemas también utiliza el método científico, pero a diferencia de la sistémica no presta especial atención a quitar énfasis a las peculiaridades de los componentes del sistema de interés. Donde sí hace énfasis es en que, dado que estudia sistemas con múltiples aspectos y niveles, tales como los ecosistemas y los sistemas de transporte, debe adoptar diferentes puntos de vista respecto de los niveles diferentes. Por ejemplo, los hospitales no son sólo edificios con equipamiento médico, sino también sistemas sociales, cuyos componentes incluyen al personal médico y a los pacientes, así como subsistemas de un sistema social de mayor envergadura, el sistema de salud, el cual es, a su vez, un subsistema de la sociedad. La novedad del análisis de sistemas radica menos en sus métodos que en los objetos que investiga, a saber, sistemas complejos hombre-artefacto que nunca antes se habían estudiado de manera científica. A diferencia de la sistémica, el análisis de sistemas no se interesa por la construcción de modelos extremadamente generales: en lugar de ello apunta a la construcción de diagramas de flujo, de red y, ocasionalmente, de modelos matemáticos específicos que –cuando ello es posible– no sólo den cuenta de la estructura y la cinemática del sistema, sino también de su dinámica, lo que permite comprender cómo funciona o cómo falla y, en consecuencia, cómo se lo puede reparar. (Para una divertida relación de algunas travesuras sistémicas véase Gall, 1977).

La sistémica, o teoría general de sistemas, es un campo de investigación científica y tecnológica de gran interés para la filosofía. Dada su generalidad, se superpone de manera considerable con la ontología o metafísica, interpretada en el sentido tradicional –prehegeliano– del término, así como con nuestra ontología científica (Bunge, 1973a, 1977a). Tanto los expertos en sistémica como los ontólogos se interesan por las

propiedades que son comunes a todos los sistemas, independientemente de su constitución particular, y a ambos les fascinan las peculiaridades de las teorías extremadamente generales, que desde el punto de vista metodológico son bastante diferentes de las teorías específicas (Bunge, 1973a, 1977c).

Las principales diferencias entre la sistémica y la ontología parecen ser éstas: (*a*) mientras que los sistemistas dan por supuestos ciertos conceptos –por ejemplo, los de propiedad, posibilidad, cambio y tiempo– los ontólogos no dan por supuesto nada, con excepción de la lógica y la matemática; (*b*) los sistemistas se interesan a menudo por los detalles del acoplamiento entre los componentes de un sistema, algo que es infrecuente en los ontólogos; (*c*) mientras que los sistemistas centran su atención en modelos de tipo insumo-producto [o entrada-salida] de sistemas que están mayormente a merced de su entorno, los ontólogos también están interesados en los sistemas libres (rasgo en el que no difieren de los físicos); (*d*) mientras que los sistemistas se ocupan principalmente de los modelos deterministas (o, mejor dicho, no estocásticos) –en parte, porque las cosas con las que tratan son de gran escala–, los ontólogos también se interesan por los modelos estocásticos; y (*e*) mientras que algunos sistemistas centran su atención en la búsqueda de analogías entre sistemas de diferentes clases y, en particular, pertenecientes a niveles distintos, los ontólogos están especialmente interesados en el análisis y la sistematización de conceptos referentes a toda clase de sistemas.

En este capítulo propondremos diferentes definiciones y principios acerca de los sistemas concretos en general. Utilizaremos estas ideas en los capítulos subsiguientes, en los cuales estudiaremos determinados géneros de sistemas. Los detalles de los modelos matemáticos de los sistemas se consignan en los dos apéndices.

1. Conceptos básicos

1.1. Agregados y sistemas

Un *agregado* o ensamblado es una colección de elementos que carece de vínculos de unión y que, por lo tanto, no tiene integridad o unidad. Los agregados pueden ser o bien conceptuales, o bien concretos (materiales). Un agregado conceptual es un conjunto. (Pero no todo conjunto

es un agregado conceptual: un conjunto provisto de una estructura es un sistema conceptual). En cambio, un agregado concreto o material es una cosa compuesta, cuyos componentes no están acoplados, ligados, conectados o vinculados, tal como un campo constituido por dos campos superpuestos, una constelación o una muestra aleatoria de una población biológica.

Dado que los componentes de un agregado no interaccionan entre sí –o no lo hacen de manera apreciable– el comportamiento de cada uno de ellos es independiente del de los demás. Por consiguiente, la historia del agregado es la unión de las historias de sus miembros. En cambio, los componentes de un sistema concreto están vinculados, por lo cual la historia de la totalidad no es igual a la unión de las historias de sus partes. Consideraremos que el enunciado anterior es una versión precisa del vago eslogan de la metafísica holística: *el todo es más que la suma de sus partes*. Pero iremos más allá de esta caracterización de la cualidad de totalidad o sistemicidad. Para ello utilizaremos unos cuantos conceptos matemáticos elementales, así como algunas nociones comunes –tales como las de cosa, propiedad y tiempo– que ya dilucidamos en el volumen anterior (Bunge, 1977a).

Un sistema, entonces, es un objeto complejo cuyos componentes están interrelacionados en lugar de aislados. Si los componentes son conceptuales, también lo es el sistema; si son concretos, o materiales, constituyen un sistema concreto (o material). Una teoría es un sistema conceptual, una escuela es un sistema concreto perteneciente a la clase de los sistemas sociales. Estos dos son los únicos reinos que reconocemos: el concreto y el conceptual. No nos son útiles los sistemas mixtos, tales como el «mundo 3» de Popper, el cual supuestamente está compuesto por objetos conceptuales, tales como las teorías, y por objetos concretos, tales como los libros (Popper, 1968; Popper y Eccles, 1977). Éstos no nos sirven porque, a fin de poder referirnos a la asociación o combinación de dos elementos, debemos especificar el vínculo, o la operación, de la asociación correspondiente. Y mientras que las teorías matemáticas especifican la manera en que se combinan los elementos conceptuales, y las teorías ontológicas y científicas se ocupan de la combinación de los elementos concretos, no hay ninguna teoría conocida que especifique el modo en que los primeros puedan combinarse con los segundos, además de lo cual no disponemos de ninguna experiencia que sugiera la existencia de tal híbrido.

Independientemente de cuál sea el reino al cual pertenece –conceptual o concreto–, podemos decir que un sistema posee una composición, un entorno [o ambiente] y una estructura determinados. La composición de un sistema es el conjunto de sus componentes; el entorno, el conjunto de elementos con los cuales aquél está relacionado; y la estructura consta de las relaciones entre los componentes del sistema, así como entre éstos y los elementos del entorno. Por ejemplo, una teoría se compone de proposiciones o enunciados, su entorno es el cuerpo de conocimientos al cual pertenece (por ejemplo, el álgebra o la ecología) y su estructura es la relación de implicación o consecuencia lógica. La fusión de estos tres elementos constituye un sistema proposicional, vale decir, un sistema $\mathcal{T}$ compuesto por un conjunto P de proposiciones incluidas en cierto cuerpo conceptual B y unidas por la relación de implicación: de forma abreviada, $\mathcal{T} = \langle P, B, \vdash \rangle$. Y la composición de una escuela es la unión de su personal y sus alumnos, su entorno es el medio natural y social en el que está inserta y su estructura consta de las relaciones de enseñar y aprender, así como de gestionar y ser gestionado, entre otras. En la descripción de un sistema es necesario incluir el entorno, porque el comportamiento del primero depende de manera decisiva de la naturaleza de su medio. Pero en el caso del universo, por supuesto, el entorno está vacío, al igual que en el caso de la importante ficción conocida como partícula libre (de un campo).

Una manera de caracterizar el concepto general de sistema es la siguiente. Sea T un conjunto no vacío. Luego, la tripleta ordenada $\sigma = \langle C, E, S \rangle$ es (o representa) un *sistema de* T sii C y E son subconjuntos mutuamente disjuntos de T (es decir, $C \cap E = \varnothing$), y si S es un conjunto no vacío de relaciones de la unión de C y E. El sistema es conceptual si T es un conjunto de elementos conceptuales y es concreto (o material) si $T \subseteq \Theta$ es un conjunto de entidades concretas, vale decir, de cosas. Sin embargo, esta caracterización no es una definición propiamente dicha, porque no nos dice con precisión cuál es la composición (o membresía) de las coordenadas C, E y S de la terna ordenada. En consecuencia, debemos definir las nociones de composición, entorno y estructura de una cosa.

1.2. Los sistemas concretos: definición

Comencemos, entonces, por la definición de la composición de un sistema. Un sistema social es un conjunto de animales vinculados social-

mente entre sí. Los cerebros de esos individuos son partes del sistema, pero no reúnen las condiciones necesarias para considerarlos miembros o componentes de un sistema social, porque los cerebros no establecen relaciones sociales de forma independiente: únicamente los animales, como totalidad, pueden mantener relaciones sociales. En otras palabras, la composición de un sistema social no es la colección de sus partes, sino sólo el conjunto de sus átomos, vale decir, aquellas partes que pueden establecer relaciones sociales. Esta noción de composición en particular es la de composición atómica o, de forma abreviada, composición-A. La *composición-A* (o *composición en el nivel A*) de una cosa x es el conjunto de las partes de x que pertenecen a A. En símbolos: sea $A \subseteq \Theta$ una clase de cosas y sea x una cosa (es decir, $x \in \Theta$). Luego, la *composición* (absoluta) de x es el conjunto de sus partes, vale decir

$$\mathscr{C}(x) = \{y \in \Theta \mid y \sqsubset x\},$$

donde '$y \sqsubset x$' designa "y es una parte de x". Y la *composición-A* de x es el conjunto de sus partes-A:

$$\mathscr{C}_A(x) = \mathscr{C}(x) \cap A = \{y \in A \mid y \sqsubset x\}.$$

A continuación presentaremos el concepto de vínculo, conexión o acoplamiento entre los componentes de una cosa. Debemos distinguir entre una mera relación, tal como la de ser más viejo, y una conexión, tal como la de ejercer presión. A diferencia de las meras relaciones, las conexiones modifican de algún modo a los elementos conectados. Vale decir, dos cosas están conectadas en el preciso caso en que al menos una de ellas actúe sobre la otra, acción que no tiene por qué consistir en la producción de un resultado, sino que puede ser la exclusión o creación de ciertas posibilidades.

A su vez, decimos que una cosa *actúa* sobre otra si la primera modifica la línea de comportamiento (o trayectoria o historia) de la segunda. La actuación de la cosa a sobre la cosa b se simboliza así:

$$a \rhd b.$$

Si una cosa actúa sobre otra y ésta no reacciona, llamamos *agente* a la primera y *paciente* a la segunda. Dado el caso de que ni la acción ni

la reacción sean nulas, diremos que las cosas *interaccionan*. Por último, dos cosas están *conectadas* (*acopladas*, *ligadas* o *vinculadas*) si al menos una de ellas actúa sobre la otra. La *vinculación* de un conjunto $A \subseteq \Theta$ de cosas es el conjunto $\mathbb{B}_A$ de vínculos (acoplamientos, ligaduras o conexiones) entre ellas. Por ende, el conjunto de relaciones entre los componentes de una entidad compleja puede descomponerse en su vinculación $\mathbb{B}_A$, por un lado, y el conjunto de relaciones no vinculantes $\overline{\mathbb{B}}_A$, por el otro.

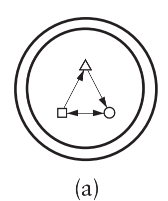
Ahora podemos introducir el concepto de *entorno-A* de una cosa x que tiene una composición-A $\mathscr{C}_A(x)$. Lo definiremos como el conjunto de todas las cosas $\mathscr{E}_A(x)$ que no pertenecen a $\mathscr{C}_A(x)$ y que actúan sobre $\mathscr{C}_A(x)$ o sobre las cuales actúa $\mathscr{C}_A(\mathrm{x})$:

$$\mathscr{E}_A(x) = \{y \in \Theta \mid \neg(y \in \mathscr{C}_A(x)) \;\&\; (\exists z)(z \sqsubset x \;\&\; (y \rhd z \vee z \rhd y))\}.$$

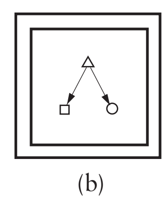
Por último, definiremos la *estructura* de una cosa como el conjunto de todas las relaciones que mantienen entre sí los componentes de la cosa, más las relaciones que se establecen entre éstos y las cosas que pertenecen al entorno de la cosa en cuestión.

Ahora disponemos de todo lo necesario para definir la noción de sistema concreto:

DEFINICIÓN 1.1 Un objeto es un *sistema concreto* sii está compuesto de, por lo menos, dos cosas diferentes conectadas entre sí.



(a)



(b)

Figura 1.1. Dos sistemas que tienen la misma composición, pero con estructuras y entornos diferentes.

Ejemplo Una molécula, un arrecife de coral, una familia y una fábrica son sistemas. En cambio, un conjunto de estados de una cosa y una colección de sucesos, aun cuando estén ordenados, no son sistemas concretos. El símbolo para éstos es $\boldsymbol{\Sigma}$.

A continuación, las tres características de todo sistema:

DEFINICIÓN 1.2 Sean $\sigma \in \Sigma$ un sistema concreto y $A \subset \Theta$ una clase de cosas. Luego,

(i) la *composición-A* de σ, en un instante dado t, es el conjunto de sus partes-A en t:

$$\mathscr{C}_{\mathrm{A}}(\sigma, t) = \{x \in A \mid x \sqsubset \sigma\};$$

(ii) el *entorno-A* de σ en el instante t es el conjunto de todas las cosas de la clase A, no pertenecientes a σ y que actúan sobre los componentes de σ, o sobre los cuales éstos actúan, en un instante t:

$$\mathscr{E}_{\mathrm{A}}(\sigma, t) = \{x \in A \mid x \notin \mathscr{C}_{A}(\sigma, t) \;\&\; (\exists y)(y \in \mathscr{C}_{\mathrm{A}}(\sigma, t) \;\&\; (x \rhd y \vee y \rhd x)\};$$

(iii) la *estructura-A* (u *organización*) de σ, en el instante t, es el conjunto de relaciones, en particular de vínculos, que establecen entre sí los componentes de σ, más los que hay entre éstos y las cosas pertenecientes al entorno de σ, en el instante t:

$$\mathscr{S}_{\mathrm{A}}(\sigma, t) = \{R_i \in \mathbb{B}_A(\sigma, t) \cup \overline{\mathbb{B}}_A(\sigma, t) \mid \mathbb{B}_A(\sigma, t) \neq \varnothing \;\&\; 1 \leq i \leq n\},$$

donde $\mathbb{B}_A(\sigma, t)$ es el conjunto de relaciones vinculantes y $\overline{\mathbb{B}}_A(\sigma, t)$ el de las relaciones no vinculantes, definidas sobre $\mathscr{C}_A(\sigma, t) \cup \mathscr{E}_A(\sigma, t)$.

Ejemplo El sistema más simple posible es el que está compuesto por dos cosas conectadas, a y b, en un entorno agrupado en una única cosa c. Vale decir, $\mathscr{C}(\sigma) = \{a, b\}$, $\mathscr{E}(\sigma) = \{c\}$. Este sistema puede tener cualquiera de las siguientes estructuras internas: $a \rhd b$, $b \rhd a$, o $a \rhd\!\lhd b$: véase la Figura 1.2. (Éstas son las estructuras internas concebibles, pero puede darse el caso de que algunas de ellas no sean nomológicamente posibles, por no mencionar técnicamente factibles o, siquiera, deseables).

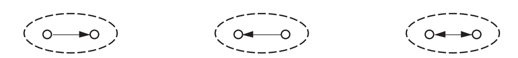


Figura 1.2. Un sistema de dos componentes con tres estructuras internas posibles.

En cuanto a las estructuras externas, pueden ser cualesquiera de las siguientes o de sus uniones: $\{a \rhd c\}$, $\{b \rhd c\}$, $\{c \rhd a\}$, $\{c \rhd b\}$.

El conocimiento exhaustivo de un sistema incluiría los siguientes elementos: (*a*) la composición, el entorno y la estructura del sistema; (*b*) la historia del sistema (en particular, si se trata de un biosistema o un sociosistema) y (*c*) las leyes del sistema. Un conocimiento tan completo sólo es asequible en raras ocasiones, especialmente en referencia a los sistemas complejos. Pero a fin de poder hablar, siquiera, de los sistemas debemos conocer, por lo menos, su composición, su entorno y su estructura. En consecuencia, podemos decir que el modelo constituido por la tripleta ordenada

$$s_A(\sigma, t) = \langle \mathscr{C}_A(\sigma, t), \mathscr{E}_A(\sigma, t), \mathscr{S}_A(\sigma, t) \rangle$$

es el *modelo mínimo* de un sistema σ, en el instante t. Obviamente, este modelo cualitativo no bastará a los fines cuantitativos, tales como predecir el ritmo de formación o de descomposición de un sistema. En consecuencia, complementaremos dicho modelo mínimo con un modelo cuantitativo que presentaremos en la Sección 2.2. Con todo, antes de hacerlo, utilizaremos el modelo mínimo para aclarar diversas cuestiones sobre los sistemas, que con frecuencia se presentan oscuras en la literatura.

1.3. Más de lo mismo

Antes de proseguir con nuestro estudio de los sistemas y sus modelos, debemos asegurarnos de que el concepto de sistema concreto no sea trivial, es decir, que algunas cosas sean sistemas, pero que otras no lo sean. El que algunas cosas no sean sistemas se deduce del supuesto de que hay cosas básicas o elementales, vale decir, cosas que carecen de partes (Volumen 3, Postulado 1.4). El que otras cosas sean sistemas se sigue, por su parte, de la hipótesis ontológica de que todas las cosas –con excepción del universo como totalidad– actúan sobre alguna cosa y, a la vez, otras cosas actúan sobre ella (Volumen 3, Postulado 5.10). En resumen, hemos demostrado el

TEOREMA (no trivial) 1.1 (i) Existen sistemas concretos. (ii) Toda cosa es componente de, al menos, un sistema.

No cabe duda de que la identificación y modelización de un sistema concreto puede ser una tarea sumamente difícil. Así pues, no siempre está claro cuál es la composición ni, en consecuencia, cuál el entorno de un sistema, en especial si éste está fuertemente acoplado a otros sistemas, como en el caso de los sistemas económico y político de una sociedad. Sin embargo, éste es un problema científico, no uno ontológico.

Adviértase que hemos definido las acciones, y las conexiones correspondientes, para las cosas, no para las propiedades. Éstas pueden ser *interdependientes*, pero no *interaccionar*. Vale decir que la frase común 'Las propiedades *P* y *Q* interactúan' debe interpretarse o bien como «Las propiedades *P* y *Q* (de una cosa dada) son interdependientes», o bien como «Las cosas que poseen la propiedad *P* interaccionan con las cosas que poseen la propiedad *Q*».

Las conexiones pueden ser permanentes o temporales, estáticas o dinámicas. En este último caso, a menudo reciben el nombre de *flujos* (de energía, como en la transferencia de calor; de materia, como en las migraciones; o de campos, como en una cadena televisiva). Si un flujo físico transporta información, decimos que la conexión es *informativa* y llamamos 'sistema de información' a la totalidad del sistema. Sin embargo, la distinción físico/informativo es únicamente de énfasis; no se trata de una dicotomía, puesto que todo flujo de información va montado sobre un flujo de energía. (Véase el Apéndice A, Sección 1.4).

Nuestra definición del entorno de un sistema como el conjunto de todas las cosas conectadas a los componentes del sistema deja claro que se trata del entorno *inmediato*, y no del entorno *total* (o conjunto de todas las cosas que no son partes del sistema). Salvo en la astronomía extragaláctica y en la cosmología, no estamos interesados en los intercambios de un sistema con el resto del universo, sino sólo con la porción de universo que ejerce influencias significativas sobre la cosa de interés. Este entorno inmediato –o medio– es la célula, en el caso de los cromosomas; el resto del organismo, en el caso de un órgano; el ecosistema, en el caso de un organismo; el sistema solar, en el caso de la biosfera y así sucesivamente. En otras palabras, el entorno inmediato de una cosa consiste en la composición del supersistema siguiente. (Más sobre ello en la Sección 1.4).

Decimos que un sistema que no actúa sobre otra cosa, y sobre el cual no actúa ninguna otra cosa, es un sistema cerrado. En otras palabras, establecemos la

DEFINICIÓN 1.3 Sea σ un sistema con un entorno $\mathscr{E}(\sigma, t)$. Luego, σ es *cerrado* en el instante *t* sii $\mathscr{E}(\sigma, t) = \emptyset$; de lo contrario, σ es *abierto*.

Puesto que todas las cosas, con excepción del universo, interaccionan con alguna otra cosa, inferimos el

COROLARIO 1.1 El universo es el único sistema cerrado en todos los instantes.

Esto vale tanto si resulta que el universo es infinito como si resulta que es finito, porque el universo puede ser definido como la cosa que posee un entorno vacío (vale decir, que es autocontenida).

Hasta aquí el concepto de cierre total. También necesitamos la noción de cierre parcial o cierre relativo a una propiedad, ya que un sistema puede ser abierto en algunos aspectos y cerrado en otros. (Así pues, por ejemplo, todos los sistemas son abiertos desde el punto de vista gravitatorio, pero algunos son cerrados desde el punto de vista eléctrico, otros lo son con respecto al intercambio de materia y otros están cerrados a las influencias culturales). En consecuencia, propondremos la

DEFINICIÓN 1.4 Sea *P* una propiedad de un sistema σ, en un entorno $\mathscr{E}(\sigma, t)$. Luego, *σ es abierto respecto de P en t* sii *P* está relacionada, en *t*, con por lo menos una propiedad de cosas pertenecientes a $\mathscr{E}(\sigma, t)$; de lo contrario, σ es *cerrado* en el aspecto *P*.

Al comparar esta definición con la anterior, se advierte que un sistema es cerrado sii es cerrado en todos sus aspectos.

Por último, algunos comentarios sobre el concepto de estructura. Nuestro uso del mismo es habitual en la matemática y las ciencias sociales. Así pues, un famoso antropólogo sostiene que, para los bioquímicos, un organismo «es un sistema de moléculas complejas integrado de manera compleja. El sistema de relaciones mediante el cual estas unidades están relacionadas es la estructura orgánica. Tal como usamos aquí los términos, el propio organismo *no* es una estructura; es una colección de unidades (células o moléculas) dispuestas en una estructura, es decir, en un conjunto de relaciones; el organismo *posee* una estructura» (Ratcliffe-Brown, 1935). Los biólogos utilizan 'estructura' unas veces en

el sentido anterior y otras como sinónimo de 'componente anatómico'. En este último caso, corren el riesgo de hablar de la estructura de una estructura.

En ocasiones resulta útil distinguir las estructuras interna y externa de un sistema. La primera es el subconjunto de la estructura total que está formado por las relaciones (en particular por las conexiones) entre los propios componentes del sistema. La estructura externa es, desde luego, el complemento de la estructura interna respecto de la estructura total. Aunque distintas, las estructuras interna y externa son interdependientes. Por consiguiente, la estructura interna de una molécula, en lugar de ser una propiedad permanente e intrínseca de la molécula, depende de manera crítica de su estructura externa, vale decir, de las interacciones entre la molécula y su medio (por ejemplo, el solvente).

Otra distinción que merece hacerse es la que hay entre la estructura total y la estructura espacial, o conjunto de relaciones espaciales entre las partes de una cosa. (No se debe confundir la estructura, o configuración espacial, con la forma. La gran mayoría de los sistemas del universo –es decir, los átomos de hidrógeno y helio– carecen de forma. Tampoco tienen forma los sistemas sociales, pese a que sí poseen configuración espacial, ya que están compuestos por seres vivos que mantienen determinadas relaciones unos con otros). Todo sistema posee tanto una estructura sistémica (o vinculación) como una estructura espacial (o configuración). En cambio, los agregados o ensamblados poseen estructura espacial, pero no estructura sistémica.

Para facilitar futuras consultas, recogeremos algunas de las dilucidaciones anteriores en la

DEFINICIÓN 1.5 Sea σ un sistema concreto con una estructura-*A* $\mathcal{S}_A(\sigma, t)$ en el instante t. Luego,

(i) la *estructura-A interna* de σ en t es el subconjunto de $\mathcal{S}_A(\sigma, t)$ compuesto por las relaciones que hay entre las partes-*A* de σ en t;

(ii) la *configuración* (o *estructura espacial*) de σ en t es el subconjunto de $\mathcal{S}_A(\sigma, t)$ compuesto por las relaciones espaciales que hay entre las partes-*A* de σ en t.

1.4. Los subsistemas

Un componente de un sistema puede ser, a su vez, un sistema o puede no serlo. Si lo es, le llamamos 'subsistema'. De forma más explícita, convenimos la

DEFINICIÓN 1.6 Sea σ un sistema con composición $\mathscr{C}(\sigma, t)$, entorno $\mathscr{E}(\sigma, t)$ y estructura $\mathscr{S}(\sigma, t)$ en el instante t. Luego, una cosa x es un *subsistema* de σ en t, o $x \prec \sigma$ sii

(i) x es un sistema en el instante t , y

(ii) $\mathscr{C}(x, t) \subseteq \mathscr{C}(\sigma, t)$ & $\mathscr{E}(x, t) \supseteq \mathscr{E}(\sigma, t)$ & $\mathscr{S}(x, t) \subseteq \mathscr{S}(\sigma, t)$.

Por definición, la relación de ser un subsistema $\prec$ es una relación de orden, vale decir que es reflexiva, asimétrica y transitiva. Por tanto, en particular, si $\sigma_1 \prec \sigma_2$ y $\sigma_2 \prec \sigma_3$, luego $\sigma_1 \prec \sigma_3$. Utilizaremos esta propiedad cuando definamos la noción de sistema de sistemas anidados (Definición 1.7).

Ejemplo 1 Las fábricas, los hospitales y las escuelas constituyen subsistemas de todas las sociedades modernas. En cambio, las personas que componen estos subsistemas no son sistemas sociales: son biosistemas. *Ejemplo 2* Un feto es un subsistema de su madre; se convierte en un sistema propiamente dicho tras el nacimiento: antes de eso no es válida para él ninguna de las leyes –naturales o sociales– que valen para los sistemas independientes.

Los sistemas de diferentes clases poseen composiciones o estructuras diferentes. (Una diferencia de composición induce una diferencia estructural, pero no a la inversa, tal como lo prueba la existencia de los isómeros, es decir, de sistemas que tienen la misma composición pero difieren en sus estructuras). Sin embargo, todos los sistemas del mismo género parecen tener la misma estructura general o «plan general», con perdón del antropomorfismo. Por ejemplo, todos los átomos constan de núcleos rodeados de electrones, todos los sólidos son redes atómicas o iónicas pobladas por electrones itinerantes, y hasta la estructura general del esqueleto y los órganos es la misma para todos los vertebrados. (Con todo, la caracterización precisa de la noción de estructura general es un problema abierto).

Con frecuencia se afirma que las estructuras se presentan superpuestas o anidadas, como un sistema de muñecas rusas. Así pues, se dice que un polipéptido posee dos estructuras, una primaria o básica –la

secuencia lineal de aminoácidos– y otra secundaria, que consiste en la configuración de la totalidad de la espiral. La configuración helicoidal de la molécula de ADN es un ejemplo de estructura secundaria. A su vez, ésta puede determinar una estructura terciaria, por ejemplo, el pliegue de la totalidad de la doble hélice según configuraciones regulares. Véase la Figura 1.3.

En nuestra opinión, no existe una jerarquía de estructuras. (Desde el punto de vista etimológico, 'jerarquía' significa un conjunto de componentes sagrados ordenados por un relación de poder o predominio). Lo que sí hay es un sistema de sistemas anidados, vale decir, una colección de sistemas, cada uno de los cuales es un subsistema de un sistema mayor (o supersistema). Y lo que los biólogos moleculares llaman 'estructura primaria' es la estructura del sistema más interno o nuclear, la estructura secundaria es la estructura del supersistema que le sigue y así sucesivamente. Esta noción está dilucidada en la

DEFINICIÓN 1.7 Sea σ un sistema y llamemos Σ a la totalidad de los sistemas, y

$$N_\sigma = \{\sigma_i \in \Sigma \mid \sigma < \sigma_i \ \& \ 1 \leq i \leq n\}$$

a una colección de supersistemas de σ parcialmente ordenada por la relación de ser un subsistema $<$. Luego,

(i) N_σ es un sistema de sistemas anidados con núcleo σ;

(ii) la *estructura primaria* de σ es la estructura del propio σ; la *estructura secundaria* de σ es la estructura del menor supersistema de σ en N_σ, vale decir σ_i ; en general, la *estructura n-aria* de σ es la estructura de σ_{n-1} .



Figura 1.3. Un sistema imaginario de muñecas rusas o jerarquía de sistemas. La estructura primaria, es decir, la secuencia de aminoácidos, no se muestra. La estructura secundaria es la hélice, la terciaria es la forma de Z y la cuaternaria es el modo en que cada una de las Z está ensamblada con las otras, vale decir, la escalera doble.

1.5. Los niveles

El discurso sobre los niveles de organización (de complejidad, integración o evolución) y sobre cierta jerarquía entre ellos ha estado muy difundido en la ciencia, especialmente en la biología, durante cerca de los últimos cien años. Desafortunadamente, no hay consenso acerca del significado de los términos 'nivel' y 'jerarquía', que se utilizan de maneras diversas y rara vez son definidos (Bunge, 1959b, 1959c). De esta vaguedad no se debe culpar solamente a los científicos, sino también a los filósofos: a los inexactos que desprecian la claridad y a los exactos que no advierten los problemas filosóficos que suscita la investigación científica. Intentemos poner remedio a esta situación aclarando el concepto de nivel, así como el de jerarquía, ampliamente usados en la ciencia contemporánea.

La idea intuitiva es simple: las cosas de un nivel dado están compuestas por cosas pertenecientes a los niveles precedentes. Así pues, las biosferas se componen de ecosistemas, los cuales están compuestos por poblaciones, las cuales se componen de organismos que, a su vez, están compuestos por células constituidas por orgánulos, los cuales están formados por moléculas que se componen de átomos y éstos están compuestos por las llamadas partículas elementales. Un modo de precisar la noción en cuestión es la

DEFINICIÓN 1.8 Sea $L = \{ L_i \mid 1 \leq i \leq n\}$ una familia de conjuntos no vacíos de cosas concretas. Luego,

(i) un nivel *precede* a otro sii todas las cosas pertenecientes a este último están compuestas por cosas que pertenecen al (a los) primero(s). Vale decir que para todo L_i y L_j pertenecientes a L,

$$L_i < L_j =_{df} (\forall x)[x \in L_j \Rightarrow (\exists y)(y \in L_i \;\&\; y \in \mathscr{C}(x))];$$

(ii) una cosa *pertenece a un nivel dado* sii está compuesta por cosas pertenecientes a (algunos o todos) los niveles precedentes. Es decir que para todo $L_i \in L$:

Para todo x de L_i: $x \in L_i =_{df} \mathscr{C}(x) \subset \bigcup_{k=1}^{i-1} L_k$;

(iii) $\mathscr{L} = \langle L, < \rangle$ es una *estructura de niveles*.

Préstese atención a los siguientes puntos. Primero, un nivel no es una cosa sino un conjunto y, en consecuencia, un concepto, si bien no se trata de un concepto vacuo. Por consiguiente, los niveles no pueden actuar unos sobre otros. En particular, los niveles superiores no pueden mandar –ni siquiera obedecer– a los inferiores. Todo discurso acerca de la acción entre niveles es elíptico o metafórico, no literal. Segundo, la relación entre niveles no es la de parte-todo ni la de inclusión de un conjunto en otro; se trata, en cambio, de una relación sui géneris que puede definirse en términos de la primera. Tercero, no hay nada oscuro en la noción de precedencia de niveles, siempre que respetemos la definición anterior, en lugar de interpretar '$L_i < L_j$' como «los L_i son inferiores a los L_j» o algo por el estilo. Cuarto, es un error llamar *jerarquía* a una estructura de niveles $\mathscr{L} = \langle L, < \rangle$, porque la de orden de niveles, $<$, no es una relación de predominio (Bunge, 1973a). Quinto, nuestro concepto es, de momento, estático: no estamos haciendo ninguna suposición acerca del origen o modo de composición de los sistemas en términos evolutivos.

1.6. La asociación de sistemas

Tanto si forman un sistema como si no lo hacen, se puede suponer que dos cosas se asocian (o se suman físicamente) para formar otra cosa. Por consiguiente, podemos suponer que la cosa a y la cosa b, independientemente de cuán distantes estén y de cuán indiferentes sean, forman la cosa $c = a + b$. En otras palabras, el conjunto de las cosas es cerrado con respecto a la operación $+$ de *asociación*, suma física o yuxtaposición (Volumen 3, Capítulo 1, Sección 1).

Ello no es así en el caso de los sistemas: dos sistemas pueden asociarse, o no, para formar un tercero. En consecuencia, es posible que dos moléculas no se combinen para formar un sistema, y que dos sistemas sociales no se fusionen para formar otro. En general, la suma física, o asociación, de dos cosas será una cosa, pero no un sistema: *la sistemicidad no se conserva*. El entorno, la estructura, y puede que hasta la composición, de la cosa resultante son diferentes de la mera unión de sus composiciones, entornos y estructuras parciales. Véase la Figura 1.4. En pocas palabras, el conjunto de todos los sistemas no tiene una estruc-

tura algebraica, ni siquiera estructura de semigrupo, que es bastante modesta. Pero, desde luego, puesto que los sistemas son cosas, sí acatan el álgebra de cosas. En particular, se asocian para formar otras cosas.

(a) (b)

Figura 1.4. (*a*) Antes de la fusión, $\mathscr{E}(\sigma_1) = \{\sigma_2\}$, $\mathscr{E}(\sigma_2) = \{\sigma_1\}$. Después de la fusión, $\mathscr{E}(\sigma_1 + \sigma_2) = \varnothing$. (*b*) Antes de la combinación, $\mathscr{S}(\sigma_1)$ = {Ligadura lineal} y $\mathscr{S}(\sigma_2)$ = {Ligadura triangular}. Después de la combinación, $\mathscr{S}(\sigma_1 + \sigma_2)$ = {Ligadura pentagonal}.

1.7. Otras clases de sistemas: de propiedades y funcionales

No sólo nos interesan los sistemas concretos, sino también los sistemas de propiedades, o conjuntos de propiedades interrelacionadas, y los sistemas funcionales, o conjuntos de procesos acoplados. Por ejemplo, la mayoría de las propiedades de una cosa son o bien simples (básicas), o bien un sistema que se mantiene unido, vale decir que un cambio en una de ellas conlleva cambios en las demás. Como consecuencia de ello, la mayoría de los cambios, sean en una cosa simple, sean en un sistema, están acoplados, de modo tal que si uno de ellos se inicia o se detiene, los demás cambian. (La prudente expresión 'la mayoría de' tiene la finalidad de excluir las propiedades superficiales, tales como la posición y el color, los cuales a menudo cambian de manera considerable, dentro de ciertos límites, sin producir cambios en las demás propiedades). Si bien casi todas las cosas, con excepción de los agregados o conglomerados, tienen propiedades y experimentan procesos que constituyen sistemas, los sistemas de propiedades y los sistemas funcionales son especialmente conspicuos entre los organismos. En particular, las facultades mentales de un animal constituyen un sistema.

Utilizaremos las siguientes convenciones:

DEFINICIÓN 1.9 Sea $p(x)$ el conjunto de propiedades de una cosa x, y sea $\pi(x)$ el conjunto de procesos que tienen lugar en x. Luego,

(i) el subconjunto $p_0(x) \subset p(x)$ es un *sistema de propiedades* de x sii toda propiedad de $p_0(x)$ está legalmente relacionada con, por lo menos, otra propiedad de $p_0(x)$:

(ii) el subconjunto $\pi_0(x) \subset \pi(x)$ es un *sistema funcional* de x sii todo proceso de $\pi_0(x)$ está legalmente relacionado con, por lo menos, otro proceso de $\pi_0(x)$.

Puesto que en un sistema todas las propiedades y todos los procesos están interrelacionados de manera legal, concluimos que, para todo x, x es un sistema concreto sii $p(x)$ es un sistema de propiedades o $\pi(x)$ es un sistema funcional.

1.8. Comentarios finales

La literatura acerca de los sistemas es vasta, está en rápido crecimiento y resulta un poco apabullante. (Cf. Klir y Rogers, 1977). Sin embargo, el campo todavía está inmaduro y su reputación en peligro por culpa de un grupúsculo de charlatanes. Baste mencionar tres indicadores de su inmadurez.

En primer lugar, la definición misma del concepto de sistema es todavía dudosa; tanto así que numerosos artículos, en su inicio, se dedican a definir o redefinir el concepto. Sin embargo, todo este esfuerzo dedicado a las definiciones sólo ha producido tres, las cuales son tan populares como incorrectas. Según la primera definición, un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados, lo cual está bien para los sistemas conceptuales, pero no para los concretos, dado que los conjuntos, independientemente de cuán estructurados sean, son conjuntos y, en consecuencia, conceptos, no cosas. La segunda definición identifica un sistema con una caja negra con entradas y salidas, lo cual está bien en unos pocos casos, pero resulta inútil cuando la estructura interna del sistema es importante. En cuanto a la tercera definición, de amplia utilización, es una generalización de la anterior, a saber: un sistema es una relación binaria; otra vez un objeto conceptual.

En segundo lugar, algunos autores afirman que todo lo concebible es un sistema y que una teoría general de sistemas debería ocuparse de todas las cosas posibles –aunque sin convertirse en parte de la filosofía– así como de todo problema posible –teórico o práctico– atinente al comportamiento de los sistemas de toda clase. Hay quien ha afirmado,

incluso, que semejante teoría no sólo debería comprender los sistemas concretos, sino también los sistemas conceptuales, de suerte tal que sería una ciencia totalmente unificada acerca de todo.

En tercer lugar, algunos entusiastas de las teorías generales de sistemas han considerado que éstas constituyen una justificación de las filosofías holísticas y, por consiguiente, una condena al método analítico característico de la ciencia. Sin embargo, la mayoría de quienes aprueban las teorías generales de sistemas por sus supuestas virtudes holísticas, o bien utilizan de manera incorrecta el término 'holístico' para designar "sistémico", o bien están interesados en el conocimiento instantáneo más que en la ardua investigación científica o filosófica.

Tales confusiones y extravagantes afirmaciones, que persisten a causa de la insuficiente investigación «fundacional» que se realiza en el campo de la sistémica, han suscitado algunas reacciones completamente negativas hacia ella (por ejemplo, Berlinski, 1976). Si bien hay algo de legítimo en esas reacciones, no se puede negar que la sistémica abunda en buenas teorías –tales como la teoría de autómatas y la dinámica de Lagrange– que son útiles en diversos campos y que proporcionan un marco inspirador para el planteamiento de problemas y la construcción de modelos. En lugar de tirar al niño con el agua del baño, hemos de cambiar ésta cada tanto.

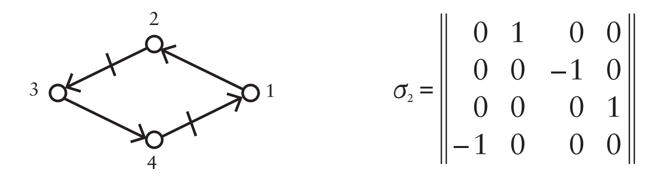
2. La representación de los sistemas

2.1. Acoplamiento de grafos y matrices

En esta sección repasaremos dos formas estándar y equivalentes de representar un sistema con una composición numerable, se trate de una molécula o de una planta industrial. Nos referimos a las representaciones de grafos y de matrices. (Véase Klir y Valach, 1967). Los siguientes ejemplos ilustrarán cómo proceder.

1 2 3
H O——O——O H
O

$$\sigma_1 = \begin{Vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{Vmatrix}$$



$$\sigma_2 = \left\| \begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right\|$$

Las flechas indican estimulación; las flechas tachadas, inhibición.



$$\sigma_3 = \left\| \begin{matrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{matrix} \right\|$$

Los bucles indican la acción sobre sí mismo (o realimentación).

Generalizaremos lo antedicho en los supuestos semánticos siguientes. Sea σ un sistema con m componentes y n clases de conexiones diferentes entre ellos (por ejemplo, mecánicas, químicas, informativas, sociales, etc.). Luego, σ puede representarse mediante

(i) un conjunto de n grafos dirigidos sobre la composición de σ, uno para cada clase de conexión, con un total de m nodos (vértices), de forma tal que (*a*) los nodos representan los componentes y (*b*) las aristas representan las conexiones; o

(ii) un conjunto de n matrices $m \times m$, ${}^{p}M$, en las cuales $1 \leq p \leq n$, tal que (*a*) el elemento matricial ${}^{p}M_{rs}$ de la p-ésima matriz representa la intensidad de la acción del componente r –en el p-ésimo aspecto– sobre el componente s; y (*b*) el elemento matricial ${}^{p}M_{rr}$ simboliza la acción de clase p del r-ésimo componente sobre sí mismo (retroalimentación).

Los elementos que están localizados fuera de la diagonal, ${}^{p}M_{rs}$, con $r \neq s$, representan conexiones con otros elementos. Hay $m^2 - m = m(m-1)$ elementos así por matriz y un total de $nm(m-1)$ por sistema con n clases diferentes de conexión. Este número se llama *capacidad de acoplamiento* del sistema.

Hasta aquí hemos representado la composición y la estructura interna de un sistema, y hemos ignorado su entorno y, en consecuencia, su estructura externa. Un sistema abierto, vale decir, un sistema conectado con su entorno, se puede representar del siguiente modo. En lugar de construir una matriz $m \times m$ para un sistema de m componentes, tal como prescribe el postulado semántico anterior, construiremos una matriz $(m + 1) \times (m + 1)$ para cada clase de conexión, y utilizaremos

‘0’ para simbolizar el entorno *en bloque*. Un componente cualquiera r del sistema para el cual $M_{0r} \neq 0$ es una entrada o componente receptor, mientras que s es una salida o componente donante del sistema si $M_{s0} \neq 0$. Por ejemplo, un sistema abierto de dos componentes, con una única clase de conexión, se puede representar mediante la matriz

$$M = \begin{Vmatrix} 0 & M_{01} & M_{02} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} \end{Vmatrix}.$$

Los elementos M_{01} y M_{02} son las entradas (para los componentes primero y segundo respectivamente), y M_{10} y M_{20} son las salidas (de los componentes primero y segundo respectivamente). Los demás elementos representan las conexiones internas (o internunciales) entre los componentes del sistema.

Generalizaremos lo anterior mediante el siguiente supuesto semántico. Sea σ un sistema con m componentes y n clases diferentes de conexiones entre ellos. Además, sea el entorno de σ, interpretado como una entidad única a la que etiquetaremos ‘0’. Luego, σ puede representarse mediante matrices n $(m + 1) \times (m + 1)$, ${}^{p}M$, en las cuales $1 \leq p \leq n$, tal que

(i) la *conectividad interna* de σ en el p-ésimo aspecto es representable mediante la matriz resultante de ${}^{p}M$, al excluir los elementos M_{r0} y M_{0s};

(ii) la *entrada* de σ en el aspecto p está representada por la fila de elementos de entrada de ${}^{p}M$, vale decir,

$$p\mathscr{I}(\sigma) = \| {}^{p}M_{01} \ \ {}^{p}M_{02} \ldots {}^{p}M_{0m} \|;$$

(iii) la *salida* de σ en el aspecto p está representada por la columna de elementos de salida de ${}^{p}M$, es decir

$${}^{p}\mathscr{O}(\sigma) = \| {}^{p}M_{10} \ \ {}^{p}M_{20} \ldots {}^{p}M_{m0} \| t,$$

donde t designa la operación de transposición (conversión de una matriz de filas en una matriz de columnas);

(iv) el *comportamiento* (o *desempeño observable*) de σ en el aspecto p es el par ordenado

$${}^{p}\beta(\sigma) = \langle p\mathscr{I}(\sigma), {}^{p}\mathscr{O}(\sigma) \rangle;$$

(v) el *comportamiento* (total) de σ es el conjunto de sus comportamientos parciales:

$$ß(\sigma) = \{^{p}ß(\sigma) \mid 1 \leq p \leq n\}.$$

Ejemplo En el más simple de los casos, el de un sistema con dos componentes que interaccionan con su entorno de un único modo, tenemos

$$\mathscr{I}(\sigma) = \begin{Vmatrix} M_{01} & M_{02} \end{Vmatrix}, \qquad \mathscr{O}(\sigma) = \begin{Vmatrix} M_{10} \\ M_{20} \end{Vmatrix}.$$

Cuando carecemos de datos o hipótesis acerca de la estructura interna (vale decir, de la matriz de acoplamiento completa) de este sistema, debemos restringir nuestra atención a su comportamiento. Lo mejor que podemos hacer es conjeturar que tal comportamiento es lineal, es decir, que existe una matriz T que transforma las entradas en salidas: $\mathscr{O} = T\,\mathscr{I}^t$, en la cual $\mathscr{I}^t$ es la traspuesta de $\mathscr{I}$. Luego, establecemos la igualdad

$$T = \begin{Vmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{Vmatrix},$$

con T_{ij} desconocidos, y realizamos las operaciones indicadas:

$$T\mathscr{I}^t = \begin{Vmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} M_{01} \\ M_{02} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} T_{11}M_{01} + T_{12}M_{02} \\ T_{21}M_{01} + T_{22}M_{02} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} M_{10} \\ M_{20} \end{Vmatrix},$$

con lo cual obtenemos el sistema algebraico

$$\begin{aligned} T_{11}M_{01} + T_{12}M_{02} &= M_{10} \\ T_{21}M_{01} + T_{22}M_{22} &= M_{20.} \end{aligned}$$

Cuando disponemos solamente del comportamiento del sistema concreto (vale decir, de los M_{0i} y los M_{j0}), este sistema de ecuaciones no

posee una solución única, puesto que en este caso contamos únicamente con dos condiciones (ecuaciones) para las cuatro incógnitas (los T_{ij}). Ni siquiera el acertar una solución mediante ensayo y error nos hará avanzar un paso en el proceso de descubrir la estructura del sistema, vale decir, la totalidad de la matriz de acoplamiento *M*. El único procedimiento que puede conducirnos al éxito es el de conjeturar y ensayar supuestos alternativos sobre la estructura del sistema, y comprobar si producen el comportamiento observado (o conjeturado).

Obviamente, ninguna de estas representaciones, de grafo o de matriz, basta a todos los fines. Cada una de ellas representa únicamente la composición, estructura y entorno de un sistema, e ignora su dinámica. La única manera de obtener una representación más completa es desarrollar una teoría dinámica hecha y derecha, mediante la incorporación y expansión de la información contenida en la representación de grafo o de matriz. A continuación, estudiaremos el núcleo común de tales representaciones dinámicas, a saber, la representación del espacio de estados. (Ver los Apéndices, para los diversos modelos matemáticos particulares –aunque transdisciplinarios– de sistemas).

2.2. La representación del espacio de estados

Todos los sistemas pertenecientes a una clase dada K poseen un número finito n de propiedades generales, tales como la edad, el número de componentes, la conectividad entre éstos, las entradas y salidas del sistema. Además, cada propiedad general puede representarse mediante una función F_i: $A \rightarrow V_i$, en la cual $1 \leq i \leq n$. Si reunimos todas estas funciones de representación de propiedades en una única tupla o lista ordenada

$$\mathbb{F} = \langle F_1, F_2, ..., F_n \rangle : A \rightarrow V_1 \times V_2 \times ... \times V_n,$$

formamos la *función de estado* de los sistemas de la clase dada. Así como $\mathbb{F}$ representa la totalidad de las propiedades generales de los sistemas de la clase K, cada valor $\mathbb{F}(a) = \langle F_1(a), F_2(a), ..., F_n(a) \rangle$ representa la totalidad de las propiedades individuales de un sistema particular, tales como su edad y composición en un instante dado.

El dominio A de la función de estado de los sistemas de la clase K es el producto cartesiano de ciertos conjuntos, tales como K, la familia 2^E de conjuntos de elementos del entorno con los cuales los miembros de K están acoplados, el conjunto F de marcos de referencia y el conjunto T de instantes, entre otros. (2^E es el conjunto potencia del conjunto E de cosas del entorno, de suerte tal que el entorno e de un sistema particular es miembro de esa familia, vale decir, $e \in 2^E$). Habitualmente, se considera que el codominio V_i del i-ésimo componente F_i de la función de estado es un subconjunto de la recta real $\mathbb{R}$. (Si se representa una propiedad mediante una función de valores complejos, cada componente de la misma se considera un componente de $\mathbb{F}$). De forma abreviada,

$$\mathbb{F}: K \times 2^E \times F \times T \times \ldots \longrightarrow \mathbb{R}^n.$$

El valor $\mathbb{F}(k, e, f, t, \ldots) = \langle a, b, \ldots, n \rangle \in \mathbb{R}^n$ de la función de estado del sistema $k \in K$, que interacciona con elementos del entorno $e \in 2^E$, relativamente al marco de referencia $f \in F$, en el instante $t \in T$, es el *estado* de k en t. La colección de todos esos estados posibles, que es un subconjunto de $\mathbb{R}^n$, es el *espacio de estados* (concebibles) de los sistemas de la clase K o, de manera abreviada, $S(K)$. Sin embargo, dado que los componentes de $\mathbb{F}$ están legalmente interrelacionados y, por consiguiente, se restringen mutuamente, no toda n-tupla de números reales representa un estado realmente (o nomológicamente) posible de un sistema. Vale decir, el *espacio de estados legal* de los sistemas de la clase K o, de forma abreviada, $S_{\mathbb{L}}(K)$, es un subconjunto propio del espacio de estados concebible $S(K)$. En resumen, todo estado realmente posible de un K es un punto de una región $S_{\mathbb{L}}(K)$ del espacio cartesiano $\mathbb{R}^n$. Véase la Figura 1.5.

Ejemplo 1 En la teoría cinética elemental de los gases, la función de estado es la terna compuesta por las funciones de presión, de volumen y de temperatura. El espacio de estados correspondiente es un cubo contenido en $(\mathbb{R}^+)^3$. *Ejemplo 2* En la dinámica hamiltoniana, el vector de estado (o de fase) es $\langle q(k, f, t), p(k, f, t) \rangle$, donde q es la coordenada canónica y p el momento correspondiente, ninguno de los cuales tiene por qué ser una propiedad mecánica. *Ejemplo 3* En la cinética química, el estado instantáneo de un sistema químico está descrito por los valores de las concentraciones parciales de los reactivos y los productos

de la reacción. En consecuencia, el espacio de estados del sistema es un hipercubo contenido en $(\mathbb{R}^+)^n$, donde n es el número de componentes del sistema (reactivos, catalizadores y productos). Si hay difusión, es necesario añadir más ejes al espacio de estados, en particular, las coordenadas de temperatura y posición. *Ejemplo 4* En la genética de las poblaciones, hay tres variables de estado de uso habitual: el tamaño de una población, la probabilidad (llamada incorrectamente «frecuencia») de algunos genes, o constelación de genes en particular, y el valor adaptativo de tales genes. Por consiguiente, para un sistema compuesto por dos poblaciones que interaccionan, A y B, el espacio de estados es la región de $\mathbb{R}^6$ abarcada por las séxtuplas $\langle N_A(t), N_B(t), P_A(t), P_B(t), v_A(t), v_B(t)\rangle$ en el curso del tiempo.

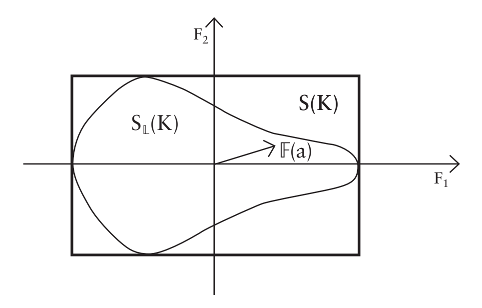


Figura 1.5. El espacio de estados legal $S_{\mathbb{L}}(K)$ de los sistemas de la clase K es un subconjunto del producto cartesiano de los componentes de la función de estado. En la figura sólo se representan dos de esos componentes, F_1 y F_2. $\mathbb{F}(a) = \langle F_1(a), F_2(a)\rangle$ es un estado (realmente) posible de un sistema particular de una clase dada. Con el transcurso del tiempo, la punta de $\mathbb{F}(a)$ se mueve por el interior de $S_{\mathbb{L}}(K)$.

El concepto de espacio de estados se puede utilizar para aclarar la noción de sistema. El espacio de estados de un agregado, o conglomerado de cosas que no interaccionan entre sí, está determinado únicamente por los espacios de estados parciales. Además, puesto que las contribuciones de éstos se encuentran al mismo nivel, podemos considerar que el espacio de estados total es igual a la unión de los espacios de estados parciales. En particular, sean $S_{\mathbb{L}}(K)$ y $S_{\mathbb{L}}(M)$ los espacios de estados legales de las cosas de las clases K y M respectivamente. Luego, el espacio de estados de la asociación $k + m$ de dos

cosas que no interaccionan entre sí, pertenecientes a las clases K y M respectivamente, y relativamente al mismo marco de referencia, es $S_{\mathbb{L}}(K) \cup S_{\mathbb{L}}(M)$. No es así en el caso de los sistemas: aquí el estado de todos los componentes está determinado, al menos parcialmente, por los estados de los demás componentes del sistema, de modo tal que el espacio de estados total ya no es la unión de los espacios de estados parciales. Por consiguiente, en el anterior Ejemplo 4, el espacio de estados de un sistema de dos componentes se debe construir *ab initio*, no sobre la sola base de los espacios de estados de las biopoblaciones individuales. En resumen, una cosa es un agregado si y sólo si su espacio de estados es igual a la unión de los espacios de estados de sus componentes; de lo contrario, es un *sistema* (concreto). (Cf. Bunge, 1977a, 1977b).

Todo suceso le acontece a una cosa concreta y consiste en un cambio de estado de la cosa. El cambio puede ser sólo cuantitativo –como en el caso del movimiento– o también cuantitativo –como en los casos de comenzar a existir o de la metamorfosis de una cosa. Un destello de luz, la disociación de una molécula, una tormenta, el crecimiento de un brote, el aprendizaje de un truco y la caída de un Gobierno son sucesos o, mejor dicho, son procesos, dado que son complejos y, en consecuencia, se los puede dividir en otros sucesos. Puesto que son cambios de los estados de las cosas, los sucesos y los procesos se pueden representar como trayectorias en los espacios de estados de las cosas que cambian. (Una cosa que no cambiara –si existiese tal cosa– tendría un espacio de estados constituido por un único punto). En un espacio de estados, diferentes trayectorias pueden tener el mismo punto final. Vale decir, hay casos en los cuales puede producirse el mismo cambio neto a través de rutas alternativas. Véase la Figura 1.6.

Se supone que las funciones g y g' que se muestran en la Figura 1.6 no son arbitrarias: si vamos a admitir únicamente sucesos legales y vamos a descartar los ilegales –vale decir, los milagros–, tales funciones deben ser legales. En otras palabras, la g que aparece en la representación del suceso, $e = \langle s, s', g \rangle$, tiene que ser compatible con las leyes del sistema de interés. De forma equivalente, un *suceso o proceso legal* que tiene lugar en un sistema de la clase K, con extremos s y s', puede representarse mediante una tripleta $\langle s, s', g \rangle$, en la cual $g : S_{\mathbb{L}}(K) \to S_{\mathbb{L}}(K)$ es compatible con las leyes de los miembros de K. Si nos desentendemos de los estados intermedios que hay entre los extremos de los procesos, nos quedamos

con las flechas o pares ordenados $\langle s, s' \rangle \in S_{\mathbb{L}}(K) \times S_{\mathbb{L}}(K)$. La colección de todos esos pares de estados –es decir, el conjunto de todos los sucesos netos (para una g dada)– constituye el *espacio de sucesos* de los K (para g). En símbolos: $E_{\mathbb{L}}(K) \subseteq S_{\mathbb{L}}(K) \times S_{\mathbb{L}}(K)$. En términos generales, la inclusión es propia: no todas las transiciones de estado son legales.

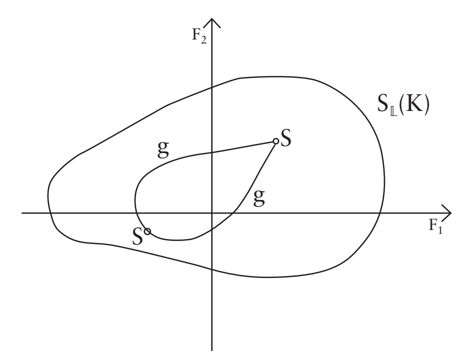


Figura 1.6. Dos procesos diferentes que tienen como resultado el mismo cambio neto. El cambio neto del estado s al estado s' puede representarse mediante el par ordenado –o flecha– $\langle s, s' \rangle$. Puesto que el cambio a lo largo de la curva g puede ser diferente del cambio a lo largo de la curva $g' \neq g$, debemos representar los sucesos (o procesos) completos con $\langle s, s', g \rangle$ y $\langle s, s', g' \rangle$ respectivamente.

Dado que en esta obra utilizaremos extensamente la representación del espacio de estados, nos conviene condensarla en el siguiente supuesto semántico. Para cada clase K de sistema que posea n propiedades, hay una función de representación de propiedades $\mathbb{F} = A \rightarrow V_1 \times V_2 \times \ldots \times V_n$, con n componentes, llamada *función de estado* de los sistemas de esa clase. Además,

(i) la *totalidad de las propiedades generales* de los sistemas de la clase K puede representarse mediante el conjunto de todos los componentes (o coordenadas) de $\mathbb{F}$, vale decir, $p(K) = \{F_i \mid 1 \leq i \leq n\}$;

(ii) todas las *propiedades particulares* de los sistemas de la clase K pueden representarse mediante un valor de un componente de $\mathbb{F}$, es decir, por medio de $F_i(a)$ para $a \in A$ y un $1 \leq i \leq n$;

(iii) el *estado* de los sistemas de la clase K en $a \in A$ se puede representar por medio del valor de $\mathbb{F}$ en a, vale decir, $s = \mathbb{F}(a) = \langle F_1(a), F_2(a), \ldots, F_n(a) \rangle$;

(iv) la colección de todos esos estados de las cosas de la clase K, vale

decir, el recorrido de $\mathbb{F}$, es el *espacio de estados legal* de los miembros de K o, de forma abreviada, $S_{\mathbb{L}}(K)$;

(v) todo *suceso* que tiene lugar en un sistema de la clase K puede representarse por medio de una tripleta ordenada $\langle s, s', g \rangle$, en la cual $s, s' \in S_{\mathbb{L}}(K)$ y g es una aplicación legal de $S_{\mathbb{L}}(K)$ en $S_{\mathbb{L}}(K)$;

(vi) la colección de todos los sucesos realmente posibles (legales) que acontecen en los sistemas de la clase K, es el *espacio de sucesos* de K o, de forma condensada, $E_{\mathbb{L}}(K)$;

(vii) para un sistema en un entorno dado, y relativamente a un marco de referencia dado, la función de estado a menudo asume la forma de una función dependiente del tiempo $\mathbb{F}$: $T \subseteq \mathbb{R}^n$, en la cual $T \subseteq \mathbb{R}$ es el conjunto de instantes relativos al marco de referencia;

(viii) si $\mathbb{F}$: $T \rightarrow \mathbb{R}^n$, luego, la totalidad de los *procesos* que tienen lugar en un sistema x de la clase K durante el intervalo temporal $\tau \subseteq T$ es representable mediante el conjunto de los estados en los que está x durante τ:

$$\pi(x, \tau) = \{\mathbb{F}(t) \mid t \in \tau\};$$

(ix) la *historia* del sistema x de la clase K, representable mediante una función de estado $\mathbb{F}$: $T \rightarrow \mathbb{R}^n$, durante el intervalo $\tau \subseteq T$, puede representarse por medio de la trayectoria

$$h(x) = \{\langle t, \mathbb{F}(t) \rangle \mid t \in \tau\};$$

(x) la *acción total* (o *efecto*) de una cosa x sobre una cosa y es igual a la diferencia entre la trayectoria forzada y la trayectoria libre del paciente y:

$$A(x, y) = h(y \mid x) \cap \overline{h(y)}.$$

Estos conceptos ya han sido tratados con todo detalle en otro trabajo (Volumen 3, Capítulo 5). A continuación, los utilizaremos para proponer un puñado de principios generales acerca de los sistemas.

3. Supuestos básicos

3.1. Cuestiones estructurales

Hasta aquí sólo hemos ofrecido unas pocas definiciones y unos cuantos supuestos semánticos, pero no hemos propuesto ninguna hipótesis sustantiva acerca de la naturaleza de los sistemas. (El Teorema 1.1, que trata de la existencia de los sistemas y la inexistencia de las cosas aisladas, así como el Corolario 1.1, sobre la calidad abierta de los sistemas, se deducen de nuestra definición de sistema concreto, junto con ciertos postulados generales acerca de la naturaleza de las cosas propuestos en el Volumen 3). A continuación, propondremos un puñado de supuestos básicos en referencia a los sistemas de toda clase. Las primeras de estas suposiciones serán postulados de tipo estructural. Dado que estos supuestos versarán sobre los intercambios de un sistema con su entorno, será mejor que definamos los conceptos de entrada y salida en términos más generales que los empleados en la Sección 2.1. Comenzaremos, entonces, con la

DEFINICIÓN 1.10 Sea σ un sistema con entorno (inmediato) $\mathscr{E}(\sigma)$. Luego,

(i) la totalidad de las *entradas* de σ es igual al conjunto de todas las acciones del entorno sobre σ:

$$U(\sigma) = \bigcup_{x \in \mathscr{E}(\sigma)} A(x, \sigma);$$

(ii) la totalidad de las *salidas* de σ es igual al conjunto de todas las acciones del sistema sobre su entorno:

$$V(\sigma) = \bigcup_{y \in \mathscr{E}(\sigma)} A(\sigma, y);$$

(iii) la *actividad del entorno* sobre σ es

$$E(\sigma) = \bigcup_{x, y \in \mathscr{E}(\sigma)} A(x, y) \cup U(\sigma) \cup V(\sigma).$$

Nuestra primera hipótesis es que los sistemas reciben entradas y son selectivos, vale decir que admiten únicamente un (pequeño) subconjunto de la totalidad de las acciones del entorno que les llegan. Más precisa-

mente, proponemos el

POSTULADO 1.1 Sea σ un sistema con una entrada total $U(\sigma)$. Luego,

(i) $U(\sigma) \neq \emptyset$;

(ii) $U(\sigma) \subset E(\sigma)$ o, de forma equivalente, la función (de selección de entradas)

$$\mu: U(\sigma) \longrightarrow E(\sigma)$$

es el mapa de inclusión (o de encaje) de $U(\sigma)$ en $E(\sigma)$.

Ejemplo Hablarles a las plantas es ineficaz, salvo en la medida en que eso las alimenta con agua y dióxido de carbono.

Otra característica de los sistemas concretos, tan ubicua como la primera, es que responden a su entorno [ambiente], es decir que su salida nunca es nula. (Las llamadas máquinas sin salida que se estudian en la teoría de autómatas son, por supuesto, ficciones). Además, en todo sistema libre hay actividad espontánea, vale decir, actividad que no ha sido producida por ninguna entrada. En consecuencia, proponemos el

POSTULADO 1.2 Sea $V(\sigma)$ la salida total de un sistema σ. Luego,

(i) $V(\sigma) \neq \emptyset$;

(ii) la función (de selección de salidas)

$$\nu : V(\sigma) \rightarrow E(\sigma)$$

asigna a cada salida del sistema una acción del entorno, pero no a la inversa.

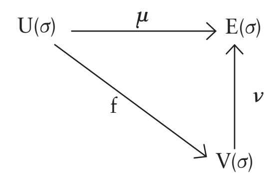
Ejemplo En toda neurona hay actividad espontánea de forma superpuesta a la actividad producida por la estimulación aferente.

Las hipótesis anteriores son principios metafísicos típicos, por cuanto pueden ser confirmados pero no refutados; la razón es que dependen de un elemento que sólo es cognoscible en parte, a saber, el conjunto E de acciones del entorno. Podemos culpar a nuestro desconocimiento de la mayoría de las E por cualquier prueba que resulte desfavorable a nuestros postulados.

La función de selección de entradas μ y la función de selección de salidas μ se reúnen en la

DEFINICIÓN 1.11 La función f que se compone con la función de selec-

ción de salidas ν de un sistema para dar como resultado su función de selección de entradas μ, vale decir, tal que $\mu = f \circ \nu$, se llama función de *transferencia* (o de *transducción*) $f : U(\sigma) \rightarrow V(\sigma)$ de σ:



Ejemplo La retina transforma (o mapea o codifica) los estímulos luminosos en señales nerviosas.

Concluimos esta subsección con una lista de principios generales que enunciaremos de modo informal:

POSTULADO 1.3 Sea σ un sistema arbitrario distinto del universo. Luego,

(i) toda entrada de σ es una salida de algún otro sistema (es decir, no se producen entradas a partir de la nada);

(ii) σ recibe entradas de diversas clases (vale decir que, indefectiblemente, en algún momento, cada uno de los componentes de la función de estado de σ será afectado por los cambios del entorno);

(iii) para toda acción que ocurre sobre σ, hay un umbral por debajo del cual σ no reacciona;

(iv) la entrada total de σ tiene un componente aleatorio distinto de cero;

(v) entre toda entrada y la correspondiente salida, si la hay, existe un retraso, independientemente de cuán pequeño sea éste.

Hasta aquí llegamos con nuestros supuestos estructurales generales. Estudiemos ahora los sistemas desde una perspectiva evolutiva.

3.2. Ensamblaje y emergencia

Todo proceso por el cual se forma un sistema a partir de sus componentes se llama 'ensamblaje' [ensamble o ensambladura] y si el proceso es espontáneo se llama 'autoensamblaje'. Un proceso de ensamblaje puede acontecer bien en un único paso o, más probablemente, en varios

pasos: véase la Figura 1.7. Podemos expresar la idea formalmente sirviéndonos del concepto de vinculación, o conjunto de vínculos entre los componentes de un sistema, presentado en la Sección 1.2. En efecto, convendremos la

DEFINICIÓN 1.12 Sea x una cosa concreta, compuesta inicialmente por partes no acopladas (que posiblemente son, ellas mismas, sistemas), es decir, tal que $\mathbb{B}(x, t) = \varnothing$. Luego,

(i) *x se ensambla formando y* en el instante $t' > t$ sii y es un sistema que posee la misma composición que x, pero cuya vinculación no es vacía, vale decir,

$$\mathscr{C}(y, t') = \mathscr{C}(x, t) \ \& \ \mathbb{B}(y, t') \neq \varnothing;$$

(ii) el proceso de ensamblaje lo es de *autoensamblaje* sii el agregado x se transforma por sí mismo [o sea, naturalmente, no artificialmente] en el sistema y;

(iii) el proceso de autoensamblaje lo es de *autoorganización* sii el sistema resultante está compuesto por subsistemas que no existían con anterioridad al inicio del proceso.

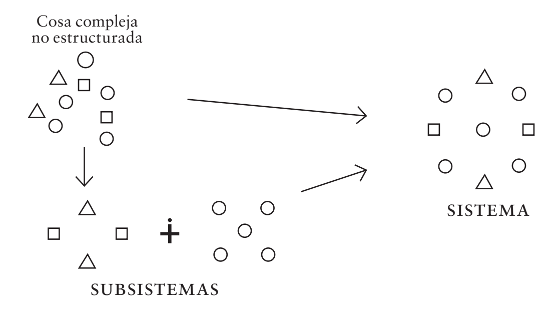


Figura 1.7. Ensamblaje de un sistema a partir de unidades previamente desconectadas, bien de forma directa, o bien mediante fases.

Los procesos de ensamblaje pueden ser naturales o artificiales, y estos últimos pueden ser, a su vez, experimentales (o de laboratorio) o industriales. Desde luego, los procesos de ensamblaje artificiales son dirigidos por los seres humanos. Sin embargo, hay grados de control. Una cosa es ensamblar una máquina a partir de sus partes y otra muy distinta

ensamblar una molécula a partir de sus precursores. En la mayoría de los casos, el segundo proceso acontece por sí mismo –vale decir, en virtud de su dinámica interna– una vez que se han provisto los reactivos y las condiciones físicas apropiadas. Por ejemplo, in vitro, las proteínas, y hasta las unidades ribosómicas, se autoensamblarán en cuestión de minutos si se suministran los precursores y las condiciones físicas adecuadas. En este caso, el hombre no hace más que ayudar a la naturaleza reproduciendo las condiciones que se dieron o pudieron haberse dado de forma espontánea.

Desde luego, todas las síntesis químicas y bioquímicas son procesos de ensamblaje que, además, conllevan la emergencia de nuevas propiedades. Pero el autoensamblaje acontece en todos los niveles y de diferentes maneras. Puede que el más conspicuo de los procesos de autoensamblaje sea la agregación, o aglutinación, de átomos y polvo cósmico atraídos por la gravedad. Se cree que éste es el modo en que se formaron los planetas y otros cuerpos celestes. Además, en lugar de conducir siempre a montones desorganizados, la atracción gravitatoria puede dar lugar a agrupaciones complejas a todos los niveles astronómicos, en particular a cúmulos estelares, galaxias y cúmulos de galaxias. (Véase, por ejemplo, de Vaucouleurs, 1970). Ejemplos parecidos de autoensamblaje por condensación de unidades de la misma clase son la formación de complejos moleculares (tales como la polimolécula de hemocianina); de polímeros, tales como los polipéptidos, y de cristales a partir de soluciones. (Véase Calvin, 1969; Eigen, 1971; Lehninger, 1975). De más está decir que el autoensamblaje y, especialmente, la autoorganización, tiene lugar también en el nivel social: obsérvese la formación de familias, bandas, comunidades y organizaciones sociales de clases diversas. En resumen, el autoensamblaje y la autoorganización no son procesos exclusivos de la vida. Lo que sí es característico de la autoorganización biótica es que produce sistemas vivos, en lugar de sistemas bioquímicos o sistemas de otra clase. (En otras palabras, se trata de un mecanismo de emergencia que conduce a un nuevo nivel de organización). Supondremos que todos los sistemas, con excepción del universo en su totalidad, se han formado mediante algún proceso de ensamblaje:

POSTULADO 1.4 Todos los sistemas, salvo el universo, se originan por ensamblaje.

Comentario 1 Los sistemas naturales se originan por autoensambla-

je y los sistemas artificiales por medio del ensamblaje artificial (realizado por el hombre). *Comentario 2* La excepción es el universo, porque (*a*) en las cosmologías naturalistas el universo no tiene ni origen ni final y (*b*) en las cosmologías religiosas no tiene sentido decir que el universo se originó mediante un proceso de ensamblaje, dado que éste presupone la existencia previa de sus componentes. *Comentario 3* Sin duda, no es éste un contraejemplo de nuestro postulado, el cual sólo exige que el sistema original se haya producido mediante un proceso de ensamblaje. *Comentario 4* Nuestro axioma dista de ser obvio y no podría haber sido formulado antes de que el pensamiento sistémico se difundiese lo suficiente, aunque más no sea porque, hasta hace poco, el concepto general de sistema no había sido dilucidado. *Comentario 5* Nuestro axioma tiene especial pertinencia para el problema del origen de las biomoléculas y los biosistemas. Hasta épocas recientes, se suponía que tanto unas como otros o bien habían sido creados por la *gracia* divina, o bien habían existido eternamente. *El origen de las especies*, de Darwin, se publicó recién en 1859 y la investigación científica de la evolución de las moléculas no se inició hasta un siglo después.

Los componentes de un sistema autoensamblado se llaman *precursores* de ese sistema, un nombre acertado que sugiere que el sistema no ha existido desde siempre, sino que ha emergido a partir de cosas preexistentes. Es interesante notar que (*a*) los precursores de un sistema no están fusionados, sino que mantienen su individualidad en cierta medida y, con todo, (*b*) hacen que una cosa posea propiedades emergentes. Por ejemplo, los dos átomos de hidrógeno que se combinan para formar una molécula de hidrógeno son componentes distintos de ésta, pese a que el espectro de la molécula difiere radicalmente del de sus componentes. Formalizamos la primera característica diciendo que la composición del sistema autoensamblado es igual al conjunto de partes de sus ancestros, vale decir, de sus precursores. Y la noción de emergencia puede dilucidarse del siguiente modo.

Llamaremos x a una cosa y $t \in T$ a un instante, además de lo cual propondremos una función p que asigna el conjunto $p(x, t)$ de todas las propiedades de x en t al par ordenado $\langle x, t \rangle$. En otras palabras, p es una función $p : \Theta \times T \to 2^{\mathbb{P}}$, donde Θ es el conjunto de todas las cosas, T el conjunto de todos los instantes y $2^{\mathbb{P}}$ es la familia de subconjuntos del conjunto $\mathbb{P}$ de todas las propiedades generales de las cosas. Se puede interpretar un cambio en la cosa x como un cambio de estado de x. Puesto

que, durante ese cambio de estado, x se mantiene fija, podemos utilizar la función más simple

$$p_x: T \to 2^{\mathbb{P}}, \text{ tal que } p_x(t) = p(x, t).$$

Resumiendo, $p_x(t)$ es la colección de propiedades de la cosa x en el instante t. (Para los detalles acerca de p_x, véase el Volumen 3, Capítulo 2).

A continuación, sean dos instantes distintos t y t', tal que t precede a t'. Los valores correspondientes de p_x son, desde luego, $p_x(t)$ y $p_x(t')$. Si estos dos conjuntos de propiedades de x son iguales, la cosa no ha cambiado cualitativamente. Si son diferentes, la cosa ha adquirido o perdido alguna propiedad. Si el caso es este último, diremos que las propiedades recién adquiridas son *emergentes* relativamente a la cosa dada, aun cuando también otras cosas puedan poseerlas. En resumen, proponemos la

DEFINICIÓN 1.13 Sea x una cosa con propiedades $p_x(t)$ en el instante t y propiedades $p_x(t')$ en el instante posterior $t' > t$. Luego,

(i) la *novedad cualitativa total* que aparece en x durante el intervalo $[t, t']$ es la diferencia simétrica

$$n_x(t, t') = p_x(t) \, \Delta \bigcup_{t < \tau \leq t'} p_x(\tau);$$

(ii) las *propiedades emergentes* que surgen en x durante el intervalo $[t, t']$ son las de

$$e_x(t, t') = \bigcup_{t < \tau \leq t'} p_x(\tau) - p_x(t).$$

Ejemplo 1 Todas las reacciones nucleares y químicas dan como resultado la emergencia de cosas provistas de propiedades emergentes. *Ejemplo 2* La descomposición (desintegración) de un sistema y la sustitución de algunos de sus componentes son procesos de emergencia.

Nos atreveremos a generalizar y propondremos el

POSTULADO 1.5 Todo proceso de ensamblaje conlleva la emergencia de ciertas propiedades y la pérdida de otras. Vale decir, sean las partes de una cosa x que se autoensamblan, formando un sistema, durante el intervalo $[t, t']$. Luego, el sistema carece de algunas de las propiedades de sus precursores –es decir, $p_x(t) - p_x(t') \neq \varnothing$– pero, a la vez, posee

algunas propiedades nuevas $-p_x(t') - p_x(t) \neq \varnothing$.

Hasta aquí nos hemos ocupado de la novedad cualitativa que emerge en una cosa en particular, sin atender la posibilidad de que también otras cosas posean esas mismas propiedades emergentes. A continuación, dilucidaremos el concepto de emergencia absoluta, o emergencia de una propiedad por primera vez.

DEFINICIÓN 1.14 Las *propiedades absolutamente emergentes* (o propiedades que aparecen por primera vez) que emergen en una cosa x durante el lapso temporal $[t, t']$ son las de

$$e_x^a(t, t') = e_x(t, t') - \bigcup_{y \in \Theta} \bigcup_{\tau \in T} p_y(\tau), \quad \text{con } y \neq x \quad \text{y} \quad \tau \leq t'.$$

3.3. La selección

Se forman sistemas nuevos permanentemente, pero no todos ellos son viables en el ambiente en el cual emergen. En realidad, un gran número de ellos no son aptos, por lo que su existencia es efímera; y ello por dos causas: o bien son internamente inestables, o bien no pueden hacer frente a las agresiones del entorno [medio o ambiente]. En este último caso, hemos de tratar con la selección. En otras palabras, el entorno selecciona los sistemas más aptos, sean moléculas, sean hombres. Esta idea puede formularse con mayor precisión del siguiente modo.

Supongamos que todo entorno realiza una acción selectiva, o de tamizado, en cada población de sistemas, cualquiera sea su clase. Esta acción selectiva consiste en reducir la población original S a un subconjunto A de S, a saber, la colección de los miembros de S viables o adaptados. Un entorno permisivo, tal como A, será casi tan grande como S, mientras que un ambiente riguroso reducirá A a un subconjunto muy pequeño, tal vez vacío, A de S. Resumiremos estas ideas en una definición y un postulado.

DEFINICIÓN 1.15 Sea S un conjunto de sistemas de una clase dada K, ensamblado durante un intervalo temporal, en un entorno $E = \mathscr{E}(\sigma)$ común a todos los $\sigma \in S$. Además, llamemos $i_E: S \rightarrow A_E$ a la función de inclusión de S en A_E, en la cual $A_E \subseteq$ S. (Vale decir, $i_E(x) = x$ para todo

x que pertenece a A_E). Luego,

(i) el entorno E realiza la *acción selectiva*

$$i_E: S \to A_E$$

en la población S sii, durante el siguiente intervalo de tiempo, únicamente los miembros de A_E permanecen en S;

(ii) A_E es el conjunto de sistemas de la clase K *seleccionados por* el (o *adaptados al*) entorno E, y $\overline{A}_E = S - A_E$ es la colección de sistemas de la misma clase *eliminados por* el (o *no adaptados* al) entorno E, durante el intervalo dado;

(iii) la *presión selectiva* que ejerce E sobre S es el número

$$p(S, E) = \frac{|\overline{A}_E|}{|S|} = 1 - \frac{|A_E|}{|S|},$$

en el cual '$|X|$' designa la numerosidad del conjunto X.

Obviamente, p asume valores entre 0 (máxima aptitud) y 1 (carencia máxima de aptitud).

La hipótesis prometida es ésta:

POSTULADO 1.6 Todos los sistemas están expuestos a la selección ambiental (o presión selectiva no nula). Vale decir que para todo conjunto S de cualquier clase K y todo entorno E común a los miembros de S, existe una función de acción selectiva $i_E: S \to A_E$, con $A_E \subset S$.

Una consecuencia directa de este axioma junto con el Postulado 1.4 es el

COROLARIO 1.2 Todo sistema autoensamblado está sometido a la selección ambiental (o una presión selectiva no nula).

Entornos diferentes pueden ejercer presiones selectivas diferentes sobre la misma población de sistemas. (Éste es el motivo de que dispongamos de tantos mapas de inclusión i_E, por cada S, como entornos posibles de los S haya). Por ejemplo, dos hábitats diferentes, o el mismo hábitat en dos estaciones del año diferentes, pueden realizar acciones selectivas diferentes sobre la misma población de organismos. Y tales acciones se componen según el

TEOREMA 1.2 Sean E y E' dos entornos consecutivos diferentes de los

miembros de una población de sistemas S de una clase dada, y sean i_E e $i_{E'}$ sus respectivas acciones selectivas (durante los respectivos períodos consecutivos). Luego, la acción selectiva resultante es igual a la composición de las dos acciones selectivas parciales, vale decir,

$$i_{EE'} = i_{E'} \circ i_E,$$

y la presión selectiva correspondiente es igual a

$$p(S, EE') = p(S, E) \cdot p(A_E, E') = \left(1 - \frac{|A_E|}{|S|}\right) \cdot \left(1 - \frac{|A_{E'}|}{|A_E|}\right).$$

Debería resultar obvio que, en general, las acciones selectivas de dos entornos no conmutan. Tanto es así que si el primer ambiente es completamente hostil, no quedará nada que el segundo pueda seleccionar. El último entorno tiene siempre la última palabra. Ver la Figura 1.8.

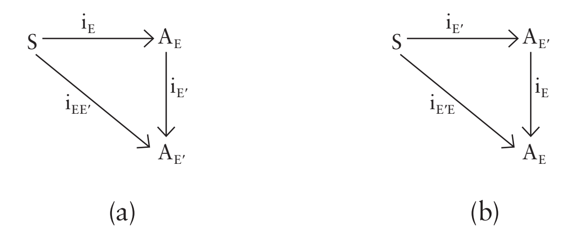


Figura 1.8. La acción selectiva de E seguido de E' (diagrama (a)) difiere de la acción selectiva resultante en el orden inverso (diagrama (b)).

Con frecuencia se afirma que el entorno no es creativo, ya que lo único que puede hacer es eliminar los sistemas no adaptados. Esto es falso. Primero, el entorno de todo sistema incluye otros sistemas, algunos de los cuales son capaces de adquirir nuevas propiedades. Segundo, todo sistema nuevo se ensambla a partir de unidades suministradas por el ambiente: éste es el que ofrece la oportunidad del autoensamblaje y, por ende, de la emergencia. En resumidas cuentas, el entorno de todo sistema es creativo, lo que sucede es que es selectivo y excluyente, en lugar de permisivo.

3.4. La evolución

El autoensamblaje puede tener como resultado la evolución, la cual puede acontecer a los niveles molecular, organísmico y poblacional entre otros. Examinemos el concepto general de evolución. Para ello, comencemos por dilucidar el concepto general de descendencia:

DEFINICIÓN 1.16 Sea S una colección de sistemas de cierta clase. Luego, para x e y que pertenecen a S,

(i) x es un *ancestro inmediato* de y (o, también, *y desciende de forma inmediata* de x) sii x e y pertenecen a la misma especie y x, o una parte de x, es un precursor del ensamblaje de y;

(ii) x es un *ancestro mediato* de y (o *y desciende de forma mediata* de x) sii existe un z que pertenece a S, tal que x es un ancestro inmediato de z, y z es un ancestro inmediato de y;

(iii) x es un *ancestro de y* (o *y desciende* de x) sii x es un ancestro o bien inmediato o bien mediato de y. En símbolos: $x < y$;

(iv) la *ascendencia* de x es la colección de ancestros de x:

$$A(x) = \{y \in S \mid y < x\};$$

(v) la *descendencia* [o *progenie*] de x es la colección de cosas de las cuales x es un ancestro:

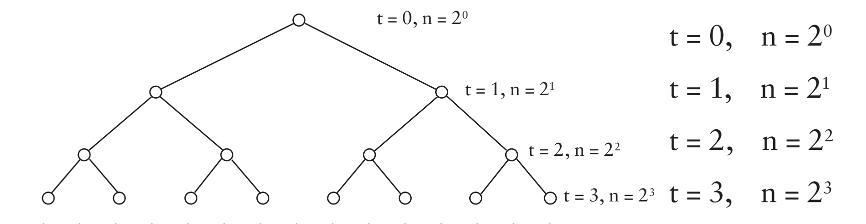
$$P(x) = \{y \in S \mid x < y\};$$

(vi) el *linaje* de x es la unión de la ascendencia y la descendencia de x:

$$L(x) = \{y \in S \mid y < x \ \text{ ó } \ x < y\}.$$

Evidentemente, la relación de ascendencia $<$ es un orden parcial estricto. Por consiguiente, el grafo de $<$ es dirigido, con aristas simples y sin bucles.

Ejemplo 1 Los hidrocarburos descienden del C y el H; los polímeros, de sus respectivos monómeros; los ribosomas, de las moléculas de ARN y las proteínas; los animales, de sus padres, etc. *Ejemplo 2* La descendencia de una bacteria que se reproduce por fisión binaria se ve así:



Si bien muchas veces los miembros del linaje de un sistema pertenecen a la misma especie, a veces, no es éste el caso. Cuando no lo es, el linaje constituye una línea evolutiva. Más precisamente, proponemos la

DEFINICIÓN 1.17 Sea $L(x)$ el linaje de un sistema x de la clase K. Luego, $L(x)$ es un *linaje evolutivo* sii al menos uno de los ancestros o uno de los descendientes de x pertenece a una clase K' diferente de K.

Las nociones de descendencia, linaje y linaje evolutivo también son aplicables a las colecciones de sistemas:

DEFINICIÓN 1.18 Sea S una familia de colecciones de sistemas: $S = \{S_i$ es una colección de sistemas $| 1 \leq i \leq n\}$. Luego, para todo S_j y S_k de S,

(i) S_k *desciende* de S_j sii cada miembro de S_k desciende de algunos miembros de S_j: $S_j \prec S_k$;

(ii) el *linaje* de S_j es la familia de colecciones que descienden de S_j, o de los cuales S_j desciende:

$$\Lambda(S_j) = \{X \in S \mid X \prec S_j \quad \text{ó} \quad S_j \prec X\};$$

(iii) $\Lambda(S_j)$ es un *linaje evolutivo* sii al menos uno de los ancestros o de los descendientes de S está incluido en una especie diferente de la que incluye a S_j.

Recordemos ahora que, según el Postulado 1.4, todos los sistemas se forman mediante un proceso de ensamblaje. Dado que un sistema y sus precursores pertenecen a especies diferentes, de ello se sigue que el ensamblaje produce especiación, es decir, la formación de nuevas especies. En otras palabras, tenemos el

TEOREMA 1.3 Todo sistema concreto pertenece a algún linaje evolutivo.

Llegado el final de esta subsección, hagamos hincapié en que suponemos que las hipótesis precedentes son válidas para los sistemas

de toda clase: físicos, químicos, biológicos o sociales. Las singularidades de estos géneros de sistemas se estudiarán en los capítulos subsiguientes.

4. La sistemicidad

4.1. Integración, cohesión, coordinación

Todo sistema es una totalidad, pero la inversa no es válida: un agregado de componentes independientes es una totalidad, pero no una totalidad integrada o unitaria. (Compárese un ser viviente con sus cenizas). Ahora bien, la sistemicidad, o integración, se presenta en grados: algunos sistemas están más estrechamente integrados que otros. El grado de integración depende de las conexiones o ligaduras que hay entre los componentes de un sistema relativamente a las acciones desintegradoras del entorno. Si los acoplamientos internos son «positivos» (o «atrayentes») y fuertes, el grado de integración es alto; si las ligaduras son «negativas» (o «repelentes»), no hay sistemicidad, o integración, en absoluto. Por último, si algunas de las ligaduras son «positivas» y otras son «negativas», el grado de integración depende de cuáles de ellas se impongan. Por ejemplo, un núcleo atómico estable se mantiene unido por medio de fuerzas nucleares que superan las repulsiones eléctricas; y una comunidad humana estable se mantiene unida mediante la participación en empresas de interés común, cuyo valor es mayor que el de la rivalidad o competencia –y ello, desde luego, hasta que sea la competencia la que prevalezca.

En el caso de los sistemas físicos, químicos y, tal vez, biológicos lo que mide su grado de integración es su energía vinculante o, lo que es equivalente, su energía de disociación. Ésta consiste en la energía mínima necesaria para disociar el sistema y separar sus componentes. En el caso de un agregado, esta energía es igual a cero. Pero tal medida no es universal: no es válida para los sistemas en los cuales la información desempeña un papel integrador por lo menos tan importante como el de las fuerzas propiamente dichas, tal como ocurre en los sistemas sociales. En resumen, no hay una medida universal del grado de integración o cohesión de un sistema. Sin embargo, podemos suponer el postulado metodológico de que es posible establecer una medida para cada género

de sistemas o, incluso, para cada clase de modelos, independientemente de la naturaleza de los componentes de los sistemas representados por esos modelos.

Ejemplo Dos cosas, a las que llamaremos 1 y 2, forman un *sistema lineal* si los componentes de la función de estado $\mathbb{F} = \langle F_1, F_2 \rangle$ de éste satisfacen las ecuaciones cinéticas

$$\dot{F}_1 = a_{11} F_1 + a_{12} F_2, \qquad \dot{F}_2 = a_{21} F_1 + a_{22} F_2,$$

en las que, por lo general, los a_{ij} son números complejos. Luego, los *grados de integración* o *cohesión* del sistema, pueden definirse como

$$w = \frac{|a_{12}|}{|a_{11} + a_{12}|} + \frac{|a_{21}|}{|a_{21} + a_{22}|}.$$

Si los a_{ij} no son constantes sino dependientes del tiempo, el propio w dependerá del tiempo. En general, $w: T \to [0, 1]$.

Si $a_{12} = a_{21} = 0$, los componentes no forman un sistema; en todos los demás casos sí. En particular, si el componente 1 controla al componente 2, $a_{12} = 0$ y $a_{21} \neq 0$, de donde $0 < w \leq 1$. Y si hay interacción simétrica, $a_{12} = a_{21} \neq 0$. Por último, si todos los a_{ij} son iguales a la unidad, $w = 1$, vale decir que el sistema tiene cohesión máxima.

Supongamos, entonces, que en cada caso es posible definir una medida $w: T \to [0, 1]$ del grado de integración de los sistemas de una clase cualquiera. Luego, mediante la representación gráfica del curso de los valores de w podemos seguir la historia del sistema, desde su formación hasta su desintegración, pasando por su etapa estable, si la tiene. En otras palabras, podemos proponer la

DEFINICIÓN 1.19 Sea σ un sistema con grado de cohesión o integración $w(t)$ en el instante t. Luego, σ es *estable* durante un intervalo temporal τ sii $w(t)$ es constante para todo $t \in \tau$ o, a lo sumo, fluctúa dentro de ciertos límites alrededor de un valor constante. De lo contrario, σ es *inestable* y, en particular,

(i) se *integra* (*forma* o *ensambla*) sii su grado de integración aumenta en el curso del tiempo;

(ii) se *desintegra* (*descompone* o *colapsa*) sii su grado de integración

disminuye en el curso del tiempo.

El grado de integración o cohesión de un sistema está relacionado con su tamaño, o número de componentes, así como con la naturaleza de éstos. Un sistema con un número extremadamente grande de componentes puede ser inestable y, finalmente, descomponerse en diversos subsistemas: siempre hay un límite superior para el tamaño de un sistema, un límite para su crecimiento. Véase la Figura 1.9. Resumiremos esta generalización empírica en el

POSTULADO 1.7 Para toda clase de sistemas hay un tamaño óptimo, es decir, un número de componentes que maximiza el grado de integración (cohesión) del sistema en un entorno dado. Llamaremos a ese número *tamaño crítico*.

Una consecuencia directa de esta suposición es que, para toda clase de sistemas, hay (*a*) un *tamaño umbral*, vale decir, un número de componentes por debajo del cual el agregado no forma un sistema y (*b*) un *tamaño máximo*, es decir, un número por encima del cual el sistema se descompone.

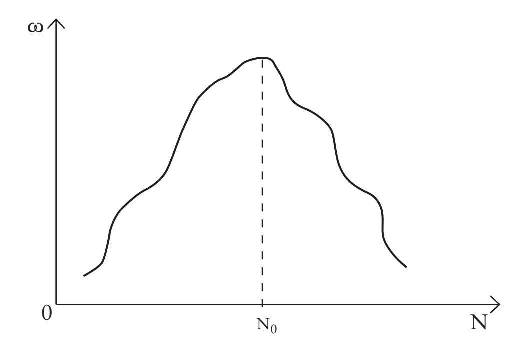


Figura 1.9. Grado de integración (o cohesión) por número de componentes, frente al número total de componentes. N_0 = tamaño óptimo o crítico

Comentario 1 A diferencia de la mayoría de los demás axiomas de nuestra teoría, el Postulado 1.7 es comprobable empíricamente. Por un lado, bien podría suceder que para los sistemas de ciertas clases haya más de un tamaño crítico. Si éste fuera el caso, tendríamos que hacer un pequeño ajuste a nuestro Postulado 1.7. *Comentario 2* La acreción producida por la fuerza gravitatoria parecería refutar nuestro

postulado. Pero no es así, ya que ese mismo proceso aumenta la densidad de la materia y la energía radiante, lo cual finalmente produce reacciones nucleares que pueden conducir o bien a una explosión o bien al colapso.

El axioma anterior se refiere a la integridad global, o cohesión, de un sistema independientemente de la integración de sus subsistemas. Si un sistema posee subsistemas, no sólo componentes, la cohesión de los subsistemas competirá con la del sistema en su totalidad. *Ejemplo 1* Una molécula con todas sus valencias saturadas es estable, por lo cual exhibe escasa adhesión con otras moléculas semejantes a ella, por ejemplo, con sus compañeras de composición en un polímero. En general, cuanto mayor sea la complejidad de una molécula, menor será su energía vinculante global. *Ejemplo 2* Las interacciones de una familia humana de gran tamaño con el resto de la sociedad, por cada miembro de la familia, son más débiles que las de una familia pequeña: los miembros de una familia grande dedican una cantidad de energía mayor a interactuar entre sí que la que dedican a interactuar con su entorno social. En consecuencia, aunque les irá bien si sucede una catástrofe, es posible que no sean buenos ciudadanos.

Resumiremos estas observaciones en el

POSTULADO 1.8 Cuanto más cohesivos sean sus subsistemas, menos cohesivo será el sistema en su totalidad.

Uno de los problemas del diseñador de sistemas, sea éste un ingeniero o un científico social aplicado, es acertar una estructura que maximice la integridad global del sistema. No puede maximizar la cohesión de cada uno de los subsistemas, porque eso los haría autosuficientes en lugar de estar al servicio de la totalidad. Tampoco puede minimizar las integridades parciales, porque en ese caso los subsistemas se harían inestables (poco fiables). Una solución de compromiso consiste en escoger subsistemas de cohesión intermedia y hacer que cierta función o papel sea desempeñado por más de uno de ellos. Este tipo de diseño aumenta la fiabilidad del sistema independientemente de su naturaleza. Véase la Figura 1.10.

Por último, otro concepto pertinente para el de sistemicidad es el de coordinación, el cual debe distinguirse del de integración. Si falla la integración, el sistema sufre una *descomposición estructural*. En cambio, la coordinación tiene que ver con la relación entre componentes o fun-

ciones cuyo resultado es el mantenimiento funcional del sistema. Si falla

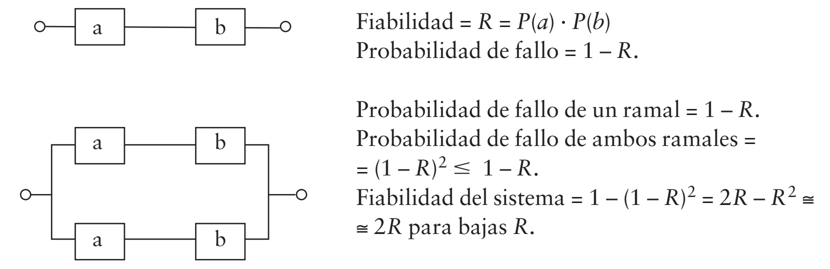


Figura 1.10. Incremento de la fiabilidad (o grado de integración) global mediante el aumento de la redundancia, vale decir, del número de subsistemas que desempeñan la misma función. $P(a)$ es la probabilidad de que un componente a desempeñe sus funciones normales.

la coordinación, el sistema sufre una *descomposición funcional*. Puede haber integración sin coordinación, pero no viceversa. Una máquina compleja que no funciona bien está integrada, pero no coordinada. En cambio, mientras están vivos, los organismos están coordinados y, con mayor razón, integrados. Una caracterización posible del concepto de coordinación lo ofrece la

DEFINICIÓN 1.19 Si x e y pertenecen o bien a la composición o bien a la estructura de un sistema, se dice que x e y están *coordinados* sii contribuyen conjuntamente a la integridad del sistema.

La coordinación no excluye la inhibición. Por el contrario: cuando la coordinación es producto del control incluye la realimentación, la cual, cuando es negativa, es una clase de inhibición. En efecto, sin ese control [o regulación] la estimulación podría destruir el sistema. Pero, desde luego, puede haber coordinación sin la intervención de un sistema de control. Por ejemplo, en los vertebrados, el cuerpo calloso es el puente entre los dos hemisferios cerebrales y, por lo tanto, hace posible su coordinación, pero no es, de por sí, un sistema de control. En cambio, el sistema nervioso central como totalidad, que sí es un sistema de control, coordina todos los subsistemas que forman un organismo vertebrado.

Hasta aquí llegamos con el concepto de totalidad. A continuación estudiaremos las tres doctrinas principales en lo referente a las totalidades.

4.2. El holismo, el atomismo y el sistemismo

En lo que concierne a las totalidades, hay tres doctrinas posibles: el holismo, el atomismo y el sistemismo. El holismo es la concepción ontológica que hace hincapié en la integridad de los sistemas a expensas de sus componentes y sus interacciones mutuas. Se caracteriza por las siguientes tesis.

H1 El todo [o totalidad] precede a sus partes. A primera vista, esta tesis parece verdadera. Así pues, antes de poder cortarnos el pelo debe habernos crecido algo de pelo. Pero, por supuesto, el cabello creció gradualmente, no de forma repentina: se convirtió en una totalidad en el curso de un proceso de multiplicación de partes (células). Antes de emitir un juicio general acerca de cuál precede a cuál, debemos examinar el proceso real en cuestión. Un sistema precede a sus componentes sólo durante el proceso de descomposición; les sucede durante el proceso de síntesis o formación. En todo caso, es posible que la existencia de un sistema no resulte obvia: puede exigir una explicación en términos tanto de las acciones de las partes entre sí como las de éstas con el ambiente. No se buscará una explicación como ésta si la totalidad se da por sentada y se la considera la razón suprema de la existencia de sus partes.

H2 El todo actúa sobre sus partes. Por ejemplo, se dirá que las necesidades del organismo (o de la sociedad) como totalidad determinan el funcionamiento de sus partes. Pero, desde luego, no habría totalidad si no fuese por la coordinación de sus partes. No existe ninguna acción del todo sobre sus partes; lo que sí hay son acciones de algunos componentes sobre otros. Así pues, los modos de vibración de una partícula en un cuerpo elástico están influidos por el movimiento de las demás partículas; asimismo, el comportamiento de cada persona está parcialmente determinado por el de las demás personas de su sociedad. En todos estos casos, no es el todo el que actúa sobre sus partes, sino que son algunas partes, o incluso todos los demás componentes del sistema, los que actúan sobre un componente dado, o bien su comportamiento está determinado por el lugar que ocupa en el sistema, en particular por su función o su papel en éste.

H3 El todo es más que la suma de sus partes. Expresada de este modo, la tesis resulta ininteligible. Se hace inteligible si con 'suma' se

quiere decir la yuxtaposición (suma física o asociación ∔), noción que ya nos encontramos en la Sección 1.6, y si 'más' significa que, siempre que se trate de un sistema, la totalidad posee propiedades emergentes de las cuales sus componentes carecen (cf. Sección 3.2). Reformulada de este modo, vale decir, de un modo no holístico, *H3* adquiere un sentido preciso, pero muestra, a la vez, que se trata de una verdad parcial. En efecto, si bien todo sistema es una totalidad, no toda totalidad es un sistema; en consecuencia, la sola agregación de las cosas no tiene necesariamente por resultado una totalidad integrada o sistema (cf. Sección 4.1). Lo que hace que una totalidad sea un sistema son, precisamente, las acciones que realizan algunas de sus partes sobre otras. Pero a los holistas no les interesa desvelar esos acoplamientos, vale decir, la estructura del sistema: el holista desprecia el análisis.

H4 El todo emerge bajo la acción de agentes que trascienden tanto las acciones entre sus componentes como las influencias ambientales. Por ejemplo, la morfogénesis está guiada por una entelequia, *élan vital* o campo morfogenético externo a sus componentes. En resumidas cuentas, la formación de las totalidades trasciende sus componentes y se la puede rastrear hasta entidades inescrutables. Hasta aquí la concepción holística de la formación de las totalidades. Huelga decir que la ciencia no necesita semejantes principios de organización, secretos y, por ende, imposibles de poner a prueba. En lugar de ello, la ciencia se basa en el principio de inmanencia, no en el de trascendencia: sólo los componentes, la forma en que éstos se reúnen y el entorno determinan qué clase de cosa será una totalidad dada. (Por eso representamos un sistema mediante una tripleta ordenada: composición-entorno-estructura).

H5 Las totalidades no pueden explicarse mediante el análisis: son irracionales. Esta tesis es trivialmente verdadera si con 'análisis' se quiere decir únicamente descomposición de un sistema en sus diferentes partes. La razón es que con tal proceder se desvela la composición de un sistema, pero no su estructura. Si se deja de lado la estructura, se hace imposible explicar las propiedades sistémicas, o globales, de una totalidad. Pero los físicos no sostienen que el agua sea nada más que un agregado de moléculas H_20, ni los sociólogos afirman que la sociedad no sea más que una colección de personas. En ambos casos, es necesario desvelar o hipotetizar los vínculos que pudiera haber entre los componentes (enlaces de hidrógeno, relaciones laborales o lo que fuere), a fin de comprender la formación, cohesión y final descomposición de una totalidad. Un

análisis como éste constituye la base conceptual de toda síntesis –o formación– eficaz, así como de todo análisis –o descomposición– eficaz de un sistema.

H6 La totalidad es mejor que cada una de sus partes. Se ha esgrimido este juicio de valor como hacha ideológica con la intención de suprimir los derechos de los individuos y los grupos en nombre del bien de la totalidad o de un sistema superior, en particular del statu quo económico-político, independientemente de que éste trabaje realmente a favor del bien común o no. No perderemos el tiempo con esta cortina de humo.

En pocas palabras, el holismo es antianalítico y, por tanto, anticientífico. Ciertamente, ha sido responsable del atraso de las ciencias no físicas, además de lo cual prácticamente no ha hecho aportaciones a la sistémica seria porque (*a*) no ha emprendido un estudio de los vínculos que mantienen unidos a los sistemas de toda clase y (*b*) en lugar de desarrollar sistemas conceptuales (teorías) para dar cuenta de los sistemas concretos, se ha desgastado en sus ataques al enfoque analítico, o atomista, y en las loas a la totalidad como tal. Las verdades que pudiera haber en el holismo –a saber, que hay totalidades, que poseen propiedades que les son peculiares y que se las debe tratar como lo que son: totalidades– están incluidas en el sistemismo, filosofía que fundamenta la sistémica o teoría general de sistemas (cf. Bunge, 1977d).

Al oponernos al holismo no nos adherimos a su opuesto el atomismo, la tesis de que, en cierto modo, la totalidad está contenida en sus partes, de suerte tal que el estudio de éstas bastaría para comprender el todo. Ciertas totalidades, los sistemas, tienen propiedades colectivas, o sistémicas, de las cuales sus componentes carecen, y éste es el motivo por el que deben ser estudiadas como sistemas. Piénsese en el celebrado pero poco comprendido ejemplo de la llamada identidad contingente, a saber, Agua = H_2O. No se trata de una identidad en absoluto, ya que mientras el miembro izquierdo de la igualdad abrevia la expresión 'cuerpo de agua', el lado derecho de la misma describe una propiedad de sus componentes moleculares. (La identidad entre una cosa y una propiedad es imposible). Lo que sí es cierto es que, desde luego, la composición molecular del agua es un conjunto de moléculas H_2O, pero no se trata de un enunciado de identidad. (En otras palabras, el enunciado correcto es el que sigue: Para todo cuerpo de agua w, $\mathscr{C}(w) \subset$ Conjunto de moléculas H_2O). Además, la especificación de la composición de un sistema no

basta para su caracterización como sistema: debemos añadir una descripción de su estructura. Y da la casualidad que el agua, como sistema compuesto por miríadas de moléculas H_2O, tiene propiedades que no posee ninguno de sus componentes, por ejemplo, la transparencia, su elevada potencia dieléctrica (y, por ende, un elevado poder disolvente), la congelación a 0ºC, etcétera. Algunas de esas propiedades deben incluirse en cualquier modelo realista del agua.

Las diferencias ontológicas entre un cuerpo de agua y una molécula H_2O son tales que para explicar el comportamiento del primero no sólo necesitamos todo el conocimiento que tenemos sobre la molécula H_2O individual, sino también multitud de hipótesis y datos acerca de la estructura del agua (vale decir, la configuración relativa de las moléculas H_2O en una red), así como hipótesis y datos referentes a la dinámica de los cuerpos de agua, hipótesis y datos que, por supuesto, variarán según el agua se encuentre en estado gaseoso, líquido o sólido. En suma, para describir, explicar o predecir las propiedades del agua utilizamos tanto microleyes como macroleyes.

El atomismo, una doctrina ontológica, está aliado habitualmente –aunque no necesariamente– con el *reduccionismo*, la doctrina gnoseológica según la cual el estudio de un sistema es reducible al estudio de sus componentes. (La inversa es falsa: se puede ser un reduccionista gnoseológico y, a la vez, reconocer las totalidades, la emergencia y los niveles). El reduccionista afirmará que, por supuesto, podemos utilizar macroleyes y, en general, leyes de sistemas por conveniencia, aunque en principio deberíamos poder arreglárnoslas únicamente con las microleyes (o leyes de los componentes), ya que las primeras son reducibles a (deducibles a partir de) las segundas. Esta tesis contiene una pizca de verdad, pero no toda la verdad. No hay ninguna teoría T_2 sobre el agua que se deduzca únicamente de una teoría microfísica T_1 sobre la molécula H_2O, ni siquiera adjuntándole a ésta lo que algunos filósofos llaman leyes puente, las cuales relacionan conceptos macrofísicos (por ejemplo, el de presión) con conceptos microfísicos (por ejemplo, el de impacto molecular). Es necesario añadir mucho más a la teoría primaria o reductora T_1 a fin de obtener la teoría secundaria o reducida, a saber, hipótesis acerca de la interacción entre los componentes del sistema.

El caso extremo de reducción es el de la deducción directa a partir de un conjunto dado de premisas, o *reducción fuerte*. Ejemplos: la reducción de la mecánica de partículas a la mecánica de medios continuos y la

de la óptica geométrica a la óptica ondulatoria. (La inversa es imposible). Éstos son casos bastante excepcionales. En general, debemos recurrir a una estrategia más compleja, la de *reducción débil*, o deducción a partir de una teoría primaria en conjunción con un conjunto de conjeturas y datos congruentes con esta teoría, pero ajenos a ella. La estructura de la inferencia es:

> $T_1 \cup$ Hipótesis subsidiarias y datos acerca de la interacción entre los componentes $\vdash T_2$.

Las hipótesis subsidiarias constituyen un modelo de la composición y estructura del sistema. Puesto que tal modelo, si bien expresado en el lenguaje de T_1, no está incluido en T_1, nos hallamos ante una reducción que no es directa (o fuerte), sino parcial (o débil). (Cf. Bunge, 1977f).

Adviértase que no afirmamos que las propiedades del agua, o de cualquier otro macrosistema, son misteriosas. Por el contrario, pueden ser explicadas, al menos a grandes trazos. Por ejemplo, el punto de ebullición y la entalpía de evaporación excepcionalmente elevados del agua pueden explicarse en términos de los enlaces de hidrógeno que ligan todas las moléculas H_2O de un cuerpo de agua, enlaces que, a su vez, son explicados mediante la composición y la estructura de la molécula H_2O. Pero lo interesante es que los enlaces de hidrógeno entre las moléculas no aparecen en la investigación de la molécula H_2O individual. En otras palabras, si bien el agua está compuesta de moléculas H_2O, no se reduce a H_2O, pese a todos los esfuerzos de los filósofos ilustrados para acabar con el monstruo holístico (por ejemplo, Kemeny y Oppenheim, 1956; Oppenheim y Putnam, 1958; Putnam, 1969).

En pocas palabras, el atomismo es casi tan falso como el holismo. La diferencia radica en que el primero estimula la investigación, mientras que el segundo la obstaculiza. Cada uno de ellos posee una pizca de la verdad que la concepción sistémica conserva y aumenta.

5. Comentarios finales

La idea de sistema como algo diferente de un agregado es muy antigua. Con todo, sólo se la ha dilucidado y desarrollado en forma sistemática en tiempos recientes. La sola sugerencia de que la cosa que estamos

observando, manipulando o investigando puede ser un sistema, en lugar de un objeto sin estructura o mero cúmulo, orientará nuestro estudio y manipulación de esa cosa. En efecto, si sospechamos que una cosa dada es un sistema, nos propondremos identificar su composición, su entorno y su estructura.

El orden en el cual aparecen las tres coordenadas del concepto de sistema es natural antes que accidental. Ciertamente, listar los componentes de un sistema debe preceder a toda pregunta acerca de su entorno y su estructura; y la identificación de su entorno es previa a la exposición de su estructura, porque ésta es la colección de relaciones de los componentes entre sí, y entre éstos y los elementos del entorno. Es verdad, cuando nos topamos con ciertos sistemas, tales como una planta, un reloj o una galaxia, que a menudo comenzamos nuestro estudio por la totalidad y su entorno, y acabamos exponiendo su composición y estructura. Pero cuando investigamos un bosque, un sistema social y, con mayor razón, un supersistema social, tal como una nación, primero nos encontramos con sus componentes (o partes atómicas) insertos en su medio, e intentamos descubrir la estructura de la totalidad mediante el estudio del comportamiento de los componentes individuales. En ambos casos, vale decir, cualquiera sea nuestro modo de percepción, el análisis conceptual debe proceder de la forma indicada –identificación de la composición, del entorno y de la estructura– aunque sólo fuera por motivos matemáticos. En efecto, no tiene sentido hacer hipótesis sobre las relaciones cuando se desconoce cuáles pueden ser los elementos relacionados (los componentes del sistema y las unidades ambientales). En consecuencia, la afirmación holística de que el análisis atomista es incapaz de comprender las totalidades es infundada. Por el contrario, el holismo es incapaz de dar cuenta de cualquier totalidad precisamente a causa de que rehúsa desvelar los componentes que se mantienen unidos en el sistema: sin componentes, no hay vínculos entre ellos. Esto no equivale a admitir la antítesis del holismo, a saber, el atomismo, ni a su habitual socio gnoseológico, el reduccionismo, según el cual las totalidades –en particular los sistemas– son artefactos, los emergentes son idénticos a los resultantes y los niveles no son más que categorías metodológicas convenientes.

La cosmovisión que surge de este capítulo es sistémica: sostiene que el universo es un sistema compuesto de subsistemas; más precisamente, que el universo es el supersistema de todos los demás sistemas. El mundo

no es ni un bloque sólido, ni un cúmulo de elementos desconectados. Lo mantienen unido diversas ligaduras, desde los enlaces intermoleculares y la gravitación hasta la información. El mundo es material, pero no es solamente un montón de entidades físicas: se compone de sistemas de una variedad de clases cualitativamente diferentes. Si bien todos los sistemas son físicos, no todos ellos son únicamente físicos. El universo es inmensamente diverso: sus componentes pueden agruparse en diferentes niveles, tales como el físico, el químico, el biológico y el social. Además, el mundo es inquieto y todos sus cambios responden a pautas (son legales). En resumidas cuentas, el universo es un sistema de sistemas coherente, o integrado, diverso, mudable y regular.



Capítulo 2

Quimismo

Todos los sistemas concretos son entidades físicas, por cuanto poseen energía, una medida de la mutabilidad (Volumen 3, Postulado 5.3). Sin embargo, algunos sistemas concretos son algo más que entidades físicas, en el sentido de que las categorías de la física resultan insuficientes para dar cuenta de ellos; por ejemplo, algunos son sistemas sociales. Y si bien algunos conceptos de la física –en particular, la noción de energía– son necesarios para dar razón de las sociedades, la mayoría de ellos resultan innecesarios. En cambio, las ciencias sociales requieren de conceptos nuevos, tales como los de artefacto, grupo social, justicia y cultura. Se supone que los conceptos característicos de las ciencias sociales representan propiedades emergentes de una sociedad, vale decir, propiedades que sus componentes no poseen. Asimismo, el estudio de los componentes de una sociedad cualquiera –es decir, de ciertos animales sociales– exige diversas categorías claramente biológicas, tales como las de reproducción, sexo y muerte. Y si el caso es que los animales poseen un sistema nervioso altamente evolucionado, necesitaremos aún más categorías, tales como los conceptos de altruismo y planificación, que habitualmente se consideran psicológicos. Por último, los organismos están compuestos de sistemas químicos, que son entidades físicas de una clase muy especial, a saber, los que se componen de átomos y moléculas involucrados en reacciones químicas.

En consecuencia, es posible agrupar la totalidad de las entidades concretas en cinco géneros: el conjunto de las cosas físicas (por ejem-

plo, los átomos y los campos), el conjunto de los sistemas químicos (por ejemplo, las unidades de síntesis de proteínas), el conjunto de los biosistemas (los organismos y sus órganos), el conjunto de los sociosistemas (las sociedades, con sus subsistemas y supersistemas) y el conjunto de las cosas artificiales. (Suponemos que el conjunto de los psicosistemas, o animales provistos de facultades mentales, es un subconjunto del de los biosistemas). Los primeros tres géneros preceden a los otros dos, en el sentido de que proporcionan los componentes de las cosas de orden superior o desempeñan algún papel en su ensamblaje. Puesto que cuanto más «inferior» es un género, más populoso es, podemos representar la estructura de la realidad como una pirámide: véase la Figura 2.1. Ello sugiere el plan de este volumen. (Más sobre esta estructura en el Capítulo 6).

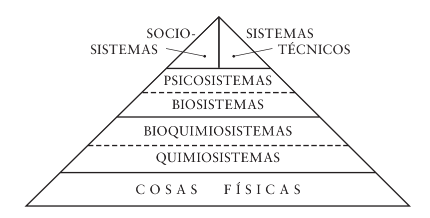


Figura 2.1. Los cinco géneros de cosas que constituyen el moblaje [o mobiliario] del mundo.

En este capítulo no trataremos de los sistemas físicos: primero, porque son los mejor comprendidos de todos y segundo, porque, en realidad, ya los hemos tratado en el Volumen 3. Nos centraremos, en cambio, en ciertas categorías químicas claves que tienen una importancia decisiva para el estudio de la vida, tales como las de reacción química, quimiosistema, proteína y ácido nucleico. Estas categorías son, por cierto, más específicas (menos universales) que las de cosa, propiedad, sistema y otras con las cuales nos hemos encontrado hasta el momento. En cambio, nuestras categorías químicas son mucho más universales que algunas de las que han dominado la ontología durante siglos, tales como las de mente y finalidad.

1. Los sistemas químicos

1.1. Los átomos

Puesto que utilizaremos ampliamente el concepto de sistema químico, debemos caracterizarlo, más aún cuando no parece haber ninguna definición de tal concepto en términos de la teoría de sistemas. Y dado que un sistema químico es aquel cuyos componentes son sustancias químicas que reaccionan, debemos comenzar por caracterizar las nociones de sustancia química y reacción.

Los componentes de un sistema químico son átomos o moléculas químicas. Una caracterización detallada de las cosas de esta clase exige ciertos conceptos científicos específicos. Afortunadamente, los átomos poseen una propiedad esencial o básica de la cual dependen muchas otras: su número atómico. Y las moléculas poseen su propia propiedad esencial, a saber, su composición atómica. Estas dos propiedades resultarán suficientes para nuestros acotados fines.

Nuestro punto de partida es, entonces, la noción de átomo químico de cierta clase, especie química elemental o, de forma abreviada, elemento. Hay ciento y tantos elementos, entre ellos el hidrógeno (H), el carbono (C), el nitrógeno (N) y el oxígeno (O), cuyos números atómicos son 1, 6, 7 y 8 respectivamente. Todos los miembros de estas clases naturales, o especies, son sistemas materiales formados por al menos dos cosas de géneros diferentes, a saber, un sistema de nucleones (protones o neutrones) y un agregado de electrones. A su vez, es probable que los nucleones se compongan de subunidades (¿quarks?[#]), además de lo cual los átomos pueden unirse para formar moléculas. Véase la Figura 2.2. (Este diagrama sugiere que las moléculas y sus componentes constituyen un *sup*-semirretículo cuyo orden es el de la relación parte-todo $\sqsubset$. En consecuencia, si a_1 y a_2 son dos átomos que forman una molécula m, $sup\ \{a_1, a_2\} = m$. Sin embargo, aquí no desarrollaremos este tema).

En resumen, robaremos a la física y a la química el

POSTULADO 2.1 Sea A un subconjunto no vacío de la colección de las cosas (o entidades) concretas y $\mathbb{N}_0$ el conjunto formado por los primeros N enteros positivos. Existe una relación (una función) de uno a muchos Z :

[#] En efecto, actualmente se considera que los nucleones no son partículas básicas, sino que están compuestos por quarks. [N. del T.]

$A \to \mathbb{N}_0$ de A sobre $\mathbb{N}_0$ (vale decir, una sobreyección) que a cada cosa de A le asigna un número de $\mathbb{N}_0$, el cual representa una propiedad de la cosa.

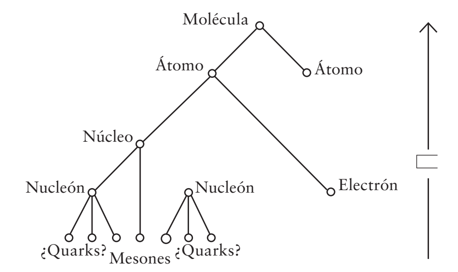


Figura 2.2. Una molécula está compuesta por dos o más átomos. Cada uno de ellos, a su vez, se compone de un núcleo y uno o más electrones. El número de protones del núcleo es igual al número atómico del átomo. Es posible que campos de mesones mantengan a los nucleones unidos en el núcleo. A su vez, todo nucleón (protón o neutrón) está compuesto de unidades menores (¿quarks?). En una molécula hay involucradas, en total, seis clases de cosas diferentes.

Desde luego, A es el conjunto de los átomos y Z el número atómico. Los átomos que poseen el mismo número atómico son equivalentes-Z:

Si x e y pertenecen a A, luego $x \sim_Z y =_{df} Z(x) = Z(y)$. El cociente de A sobre $\sim_Z$, o $A / \sim_Z$, es la familia de clases de átomos que tienen el mismo valor de Z. (No necesitamos la distinción, más refinada, entre los isótopos de un elemento). En otras palabras, podemos convenir la

DEFINICIÓN 2.1 Sea A el dominio de la función $Z : A \to \mathbb{N}_0$. Luego,

(i) si x pertenece a A, x es un *átomo*;

(ii) llamamos *número atómico* a la propiedad representada por la función Z y *número atómico de a* al valor $Z(a)$ de Z en $a \in A$;

(iii) el n-ésimo conjunto

$$^{n}A = \{x \in A \mid Z(x) = n\}, \quad \text{para } 1 \leq n \leq N,$$

es la n-ésima *clase atómica*, o *elemento químico*;

(iv) la partición

$$\mathscr{A} = A / \sim_Z = \{^{n}A \subset A \mid 1 \leq n \leq N\}$$

es la *familia de clases atómicas* o *elementos químicos*.

Puesto que, por definición, $\mathscr{A}$ es la partición de A inducida por $\sim_Z$,

$$A = \bigcup_{n=1}^{N} {}^{n}A \quad \text{y} \quad {}^{m}A \cap {}^{n}A = \emptyset, \quad \text{para } m \neq n.$$

En otras palabras, la totalidad de los átomos es la unión disjunta de todas las clases atómicas. Éstas son las que aparecen en la tabla periódica. No sabemos si el número de átomos de cada clase atómica es finito o no.

Hasta aquí llegamos con los componentes (atómicos) de las moléculas.

1.2. Las moléculas

Una molécula es un sistema compuesto por átomos o, si se lo prefiere, por núcleos y electrones. Las moléculas varían desde el hidrógeno, o H_2, (peso molecular = 2) hasta los ácidos desoxirribonucleicos o ADN (con un peso molecular de hasta mil millones). Existen alrededor de cuatro millones de especies conocidas de moléculas, el 96 por ciento de las cuales contiene carbono. Las combinaciones entre los átomos para formar moléculas son producidas por enlaces o bien iónicos, o bien covalentes. A su vez, las moléculas se mantienen unidas gracias a enlaces de hidrógeno o por fuerzas van der Waals (por ejemplo, fuerzas hidrofóbicas). En última instancia, todos estos enlaces son fuerzas eléctricas y son estudiadas por la química cuántica, una aplicación de la mecánica cuántica.

En la ontología damos por supuestos estos enlaces y dejamos a los químicos la tarea de indagar cuál es su naturaleza. (Recuérdese el destino de la supuesta refutación de Hegel de la brillante hipótesis propuesta por Berzelius de que los enlaces químicos son eléctricos: cf. Hegel, 1830, Sección 330). El metafísico acepta agradecido lo que el químico esté dispuesto a enseñarle acerca de la formación espontánea (autoensamblaje) de moléculas, a partir de átomos o de otras moléculas, así como de la descomposición o disociación de esos sistemas como resultado de su interacción con el entorno (en particular, del movimiento térmico). La tarea del filósofo no es competir con el químico, sino intentar descubrir la estructura y las peculiaridades de los procesos químicos en relación con otras clases de procesos. Si en el transcurso de su trabajo produce resultados que contribuyen a aclarar los fundamentos de la química, tanto mejor.

Hay diferentes maneras de hacer más precisa la afirmación de que todas las moléculas están compuestas por átomos. Aquí haremos lo siguiente. Considérese, por ejemplo, la primera especie atómica o

^{1}A = H = El conjunto de todos los átomos de hidrógeno = $\{x \in \Theta \mid Z(x) = 1\}$.

Puesto que no estamos prestando atención a las diferencias individuales que hay entre los átomos de hidrógeno a fin de concentrarnos en el número atómico que comparten, podemos considerar que la especie H está formada por un número no específicado de copias de un único individuo. Supongamos, a continuación, que cada átomo de hidrógeno puede combinarse con un número cualquiera de átomos H formando moléculas de hidrógeno –posibles, como las diatómicas, e imposibles, como las compuestas por 20 átomos. Dado que pasamos por alto las idiosincrasias y nos hemos concentrado en la composición atómica, podemos hablar de la concatenación de un átomo de hidrógeno no especificado x m veces consigo mismo, o $x \cdot x \cdot \ldots \cdot x = x^m$, que representa la combinación de m átomos de hidrógeno. De esta manera, formamos

$^{1}A^*$ = H* = El conjunto de las concatenaciones finitas de átomos de hidrógeno.

Ahora imaginemos que efectuamos la misma construcción para cada especie, de forma tal que tenemos

$^{n}A^*$ = El conjunto de las concatenaciones finitas de átomos de la clase ^{n}A.

Este conjunto es la unión de los conjuntos siguientes:

$$^{n}A_1 = \{z \in \Theta \mid z \in {}^{n}A\},$$
$$^{n}A_2 = \{z \in \Theta \mid z = x^2 \;\&\; x \in {}^{n}A\},$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$^{n}A_m = \{z \in \Theta \mid z = x^m \;\&\; x \in {}^{n}A\}.$$

En otras palabras, el conjunto de todos los compuestos ^{n}A concebibles es

$$^{n}A^* = \bigcup_m {}^{n}A_m = \{z \in \Theta \mid z = x^m \;\&\; x \in {}^{n}A \;\&\; 1 \leq m < \infty\}.$$

Pero, desde luego, no todos los compuestos concebibles son realmente posibles, vale decir, legales. (Para la definición del concepto de posibilidad real en términos de legalidad, véase el Volumen 3, Capítulo 4, Sección 2.3). Los compuestos realmente posibles a partir de ${}^{n}A$ son un subconjunto propio de ${}^{n}A^{*}$, es decir,

$${}^{n}A^{**} = \{z \in \Theta \mid z = x^{m} \;\&\; x \in {}^{n}A \;\&\; 1 \leq m < \infty \;\&\; z \text{ es legal}\}.$$

(No piense el lector únicamente en los compuestos estables que satisfacen las condiciones de valencia, sino también en todas las moléculas y radicales libres cuya vida es efímera). Se trata de todos los compuestos homogéneos, es decir, de las moléculas compuestas por átomos de una única especie atómica. Un compuesto heterogéneo, tal como el miembro de la especie química CH_4, o metano, es un miembro del conjunto

$${}^{1}A_{4}{}^{6}A_{1} = \{z \in \Theta \mid z = x^{4}y \;\&\; x \in {}^{1}A \;\&\; y \in {}^{6}A\}.$$

La totalidad de los compuestos heterogéneos es

$$A^{*} = \{z \in \Theta \mid z = x_{1}^{m1}\, x_{2}^{m2} \ldots x_{\mathrm{N}}^{mN} \;\&\; x_{i} \in {}^{i}A \;\&\; 1 \leq i \leq N \;\&\; 0 \leq m_{i} < \infty\}.$$

Éste es el conjunto de todas las moléculas concebibles y es, a la vez, un superconjunto de todas las moléculas reales.

La estructura de A^{*} es, obviamente, la de un semigrupo con la operación $\cdot$ de combinación o concatenación. Expresado de manera más exacta, la estructura $\langle A^{*}, \cdot\rangle$ es el *semigrupo libre generado por conjunto A* de los átomos, y la razón por la que esto es así es que todo elemento de A^{*} es o bien un miembro de A, o bien una sarta de miembros de A. Ahora bien, tal como hemos advertido previamente, A^{*} no sólo contiene las moléculas realmente posibles, sino también aquellas que son ilegales. Si reducimos A^{*} al subconjunto A^{**} de las moléculas realmente posibles, nos vemos ante la dificultad de que A^{**} no está cerrado respecto de la operación $\cdot$ de combinación o concatenación (vale decir, no contiene todas las cadenas). De forma equivalente, $\cdot$ es una operación *parcial* en A^{**}, vale decir, una operación que no está definida para todo par de miembros de A^{**}. En consecuencia, diremos que el sistema $\mathscr{A}^{**} = \langle A^{**}, \cdot\rangle$ es un semigrupo

parcial, *encajado* en el semigrupo libre $\mathscr{A}^* = \langle A^*, \cdot \rangle$ generado por A. En otras palabras, establecemos el

POSTULADO 2.2 Sea $\mathscr{A}^* = \langle A^*, \cdot \rangle$ el semigrupo libre generado por el conjunto A de todos los átomos de todas las clases (Postulado 2.1), y llamemos

$$A^{**} = \{z \in \Theta \,|\, z = x_1^{m1}\, x_2^{m2} \ldots x_N^{mN} \;\&\; x_i \in {}^iA \;\&\; 1 \leq i \leq N \;\&\; 0 \leq m_i < \infty \;\&\; z \text{ es legal}\}.$$

Luego,

(i) el semigrupo parcial $\mathscr{A}^{**} = \langle A^{**}, \cdot \rangle$ está encajado en $\mathscr{A}^*$;

(ii) para dos cosas cualesquiera x e y que pertenecen a A^{**}, si xy pertenece a A^{**}, luego, xy representa la combinación de x con y (o el compuesto xy).

Adviértase que no postulamos que $\mathscr{A}^{**}$ sea un semigrupo conmutativo. Por consiguiente, los isómeros xyz e yxz serán moléculas distintas.

El axioma anterior sirve de base para las siguientes convenciones que nos serán de utilidad más adelante.

DEFINICIÓN 2.2 Sea $\mathscr{A}^{**}$ el conjunto definido en el Postulado 2.2. Luego,

(i) el conjunto de los *compuestos* es el complemento de A^{**} respecto de A, vale decir,

$$M = A^{**} - A = A^{**} \cap \overline{A};$$

(ii) todo subconjunto de M, de la forma

$$M_j = \{z \in \Theta \,|\, z = x_1^{m1}\, x_2^{m2} \ldots x_N^{mN} \;\&\; x_i \in {}^iA \;\&\; 1 \leq i \leq N\},$$

con valores fijos de los m_i para $0 \leq m_i < \infty$, es una *especie molecular*;

(iii) todo miembro de una especie molecular es una *molécula*.

(Advierta el lector la estrategia de, primero, definir un conjunto y, después, poner nombre a sus miembros).

DEFINICIÓN 2.3 La *composición* de una molécula es el conjunto de sus constituyentes. Vale decir, sea

$$\mathscr{C}^{**} : A^{**} \to 2^{A^{**}}$$

la función que aplica el conjunto de los átomos y las moléculas a su conjunto potencia, tal que si $z = x_1^{m1} x_2^{m2} \ldots x_N^{mN} \in A^{**}$, donde $x_i \in {}^iA$ y $0 \leq i < \infty$,

$$\mathscr{C}^{**}(z) = \{x_1^{m1} x_2^{m2} \ldots x_N^{mN}\}.$$

Luego, $\mathscr{C}^{**}(z)$ es la *composición* de la molécula z.

Ejemplo La composición de la glucosa, $C_6H_{12}O_6$, está dada por:

si $z \in C_6H_{12}O_6$, luego, $\mathscr{C}^{**}(z)$ = {6 carbonos, 12 hidrógenos, 6 oxígenos}.

La definición siguiente requiere la generalización, a un conjunto arbitrario T de cosas, de la noción de suma (o asociación) física presente en la fórmula '$a + b = c$'. Para un conjunto arbitrario T de cosas, la asociación o suma de sus miembros es la cosa $[T] = \sup T$ = menor cota superior de T. (Obviamente, para todo x de T, $x \sqsubset [T]$).

DEFINICIÓN 2.4 Sea x una cosa. Luego,

(i) x es *química* sii x es o bien un miembro de A^{**} (es decir, un átomo o una molécula), o bien un agregado de un conjunto finito de átomos o moléculas; vale decir, si hay un $T \subset A^{**}$, tal que $x = \sup T = [T]$;

(ii) x es un *compuesto* sii x es o bien una molécula, o bien un agregado de un conjunto finito de moléculas, vale decir, $x \in M = A^{**} - A$ ó $x = [T]$, con $T \subset M$;

(iii) x es un *polímero* sii x es o bien una sarta de moléculas de una única especie molecular, o bien un agregado de un conjunto finito de sartas de diferentes especies moleculares.

Los polímeros tienen un interés especial para nosotros, porque todas la biomoléculas son polímeros. En particular, las moléculas de ADN son cadenas de polímeros sumamente largas.

Finalmente, estipulamos la

DEFINICIÓN 2.5 Sea A^{**} la totalidad de los compuestos, y $l : A^{**} \rightarrow \mathbb{N}$ una función que asigna un número natural a cada átomo o molécula. Luego, la *longitud* de un miembro de z de A^{**} es igual al número de átomos que hay en z. Más precisamente,

$$\text{si } z = x_1^{m1} x_2^{m2} \ldots x_N^{mN} \in A^{**}, \quad \text{luego, } l(z) = m_1 + m_2 + \ldots + m_N.$$

Este concepto de longitud es válido para todas las moléculas independientemente de su forma, no sólo para las que son lineales. Por consiguiente, según nuestra definición, la longitud de la molécula plana de CH_4 es igual a 5.

Hasta aquí las cuestiones estructurales. (Para tratamientos algo diferentes, véase Rosen, 1959, y Chiaraviglio, 1965). A continuación, ocupémonos de los procesos químicos.

1.3. Los sistemas químicos

Caracterizaremos los sistemas químicos como sistemas cuyos componentes son sustancias químicas cuyo número (o concentración) cambia en virtud de estar experimentando reacciones. Para hacer más precisa esta idea, nos serviremos de la representación de estados de los sistemas que presentamos en la Sección 2.2 del Capítulo 1. Considérese un sistema concreto representado por una función de estado dependiente del tiempo $\mathbb{F} = \langle F_1, F_2, \ldots, F_n \rangle$, cada componente (coordenada) de la cual representa una propiedad del sistema. La función de estado abarca todo el espacio de estados legal del sistema. A continuación, distinguiremos los componentes de $\mathbb{F}$ que representan los números (o la concentración) de las sustancias químicas del sistema. La función de estado resultante, así como el subespacio de estados que conlleva, merecen tener sus propios nombres:

DEFINICIÓN 2.6 Sea T el intervalo temporal (relativamente a un marco de referencia dado) y sea

$$\mathbb{F} = \langle F_1, F_2, \ldots, F_n \rangle : T \to \mathbb{R}^n$$

una función de estado para un sistema arbitrario σ de cierta clase, que satisface las leyes del conjunto $\mathbb{L}$. Además, sean las primeras $m < n$ coordenadas de $\mathbb{F}$ (en un instante dado) iguales al número de componentes de cada clase de sustancia química del sistema (en ese instante). Luego,

(i) la función

$\mathbb{F}_c = \langle F_1, F_2, \ldots, F_m \rangle$, con $F_i(t)$ = Número de átomos o moléculas de la clase $K_i \subset A^{**}$ de σ en el instante $t \in T$, se llama *función de estado de composición* de σ;

(ii) el valor de la función de estado de composición en el instante $t \in T$, vale decir, $\mathbb{F}_c(t)$, se llama *composición instantánea* de σ;

(iii) el conjunto de todas las composiciones instantáneas posibles de σ, es decir,

$$S_c(\sigma) = \{\mathbb{F}_c(t) \in \mathbb{R}^n | \ t \in T \ \& \ \mathbb{F}_c \text{ satisface } \mathbb{L}\},$$

se llama *espacio de estados de composición* de σ.

Ejemplo La función de estado de composición de un sistema en el que se forma agua a partir de hidrógeno y oxígeno, según la reacción $2H_2 + O_2 \rightharpoonup 2H_2O$, tiene

el *valor inicial* $\mathbb{F}_c(t_i) = \langle 2, 1, 0\rangle$

y (tras la compleción de la reacción)

el *valor final* $\mathbb{F}_c(t_f) = \langle 0, 0, 2\rangle$,

donde los enteros son los números de moléculas de las sustancias químicas presentes en el sistema. Si deseamos representar todo el proceso, desde su comienzo hasta su finalización, en lugar de usar únicamente sus estados inicial y final, podemos utilizar las concentraciones parciales para obtener

$$\mathbb{F}_c = \langle C_{H_2}, C_{O_2}, C_{H_2O}\rangle,$$

donde cada coordenada de la terna es una función que va de T a $\mathbb{R}$. Una condición para poder utilizar estas funciones es que el sistema sea lo bastante voluminoso, tal como se supone, de forma tácita, en la cinética química.

Por último, podemos estipular la

DEFINICIÓN 2.7 Sea σ un sistema concreto con una función de estado $\mathbb{F}$ de n componentes (en una representación dada). Luego, σ es un *sistema químico*, o *reactor químico*, durante el período $\tau \subseteq T$ sii

(i) las primeras coordenadas m de $\mathbb{F}$, donde $0 < m < n$, forman la función de estado de composición $\mathbb{F}_c$ de σ (vale decir que σ está compuesto, entre otras cosas, por sustancias químicas: $\mathscr{C}(\sigma) \cap A^{**} \neq \emptyset$);

(ii) el valor instantáneo del i-ésimo componente F_i de $\mathbb{F}_c$, para $1 \leq i \leq m$, es igual al número de átomos o moléculas (o, de forma alter-

nativa, a la concentración) de la *i*-ésima clase natural (o especie) química incluida en A^{**} en el instante de interés;

(iii) la composición química de σ (o sea, el valor de $\mathbb{F}_c$) cambia en el transcurso de τ, y este cambio no consiste sólo en el transporte desde o hacia el entorno de σ.

Según la definición anterior, únicamente se puede hablar de sistema químico en los casos en que se producen reacciones químicas, mientras éstas se están produciendo. En consecuencia, una pila gastada ya no es un sistema químico. Antes del inicio de las reacciones y después de su compleción, se trata de un sistema físico; sólo es químico potencialmente. (Por consiguiente, un sistema químico es un sistema esencialmente dinámico que, a lo sumo, puede estar en un estado de equilibrio dinámico, o estado estacionario, que es aquel en el que todas las reacciones se producen al mismo ritmo que sus inversas, por lo cual no tiene lugar una variación neta de la composición del sistema). Lo anterior sugiere la

DEFINICIÓN 2.8 Un sistema concreto σ es un *sistema físico* durante el período τ sii la función de estado de composición de σ es constante (por ejemplo, nula) en todo τ o, si cambia, si lo hace mediante el transporte desde, o hacia, el entorno de σ.

En resumen, un sistema químico es un sistema cuya composición química cambia con el tiempo, independientemente de cuán lento sea ese cambio y siempre que el cambio no consista en la sola importación o exportación de sustancias químicas, sino en procesos en los que sus componentes estén involucrados. Estos procesos son, desde luego, las reacciones químicas. Echémosles un vistazo.

1.4. Las reacciones químicas

Todo proceso realmente posible (legal) que tiene lugar en un sistema químico puede representarse como una curva en el espacio de estados total del sistema. Cada *m*-tupla de concentraciones iniciales del sistema se corresponde con una trayectoria singular de la punta del vector de estado $\mathbb{F}$. ($\mathbb{F}$ no es, realmente, un vector, porque su producto por un número real arbitrario puede situarse fuera de los límites establecidos por las leyes). El haz compuesto por todas las variaciones de esas trayectorias posibles, para todas las variaciones de condiciones

iniciales y todos los sistemas de la misma clase, representa la totalidad $\mathbb{L}$ de las leyes «en funcionamiento» en los sistemas químicos. Puesto que un sistema es químico únicamente si en él están teniendo lugar transformaciones químicas, el conjunto $\mathbb{L}$ incluye todas las leyes de esas transformaciones, en particular, las fórmulas de las reacciones y sus respectivas ecuaciones cinéticas. Pero, desde luego, $\mathbb{L}$ también incluye toda otra ley satisfecha por (que posea) el sistema químico de la clase dada. Véase la Figura 2.3.

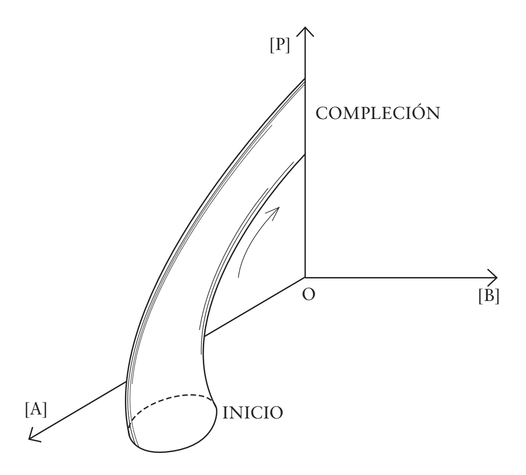


Figura 2.3. Espacio de estados de composición de un sistema químico en el cual únicamente tienen lugar reacciones de la forma $A + B \rightharpoonup P$. $[X]$ designa la concentración de X. Cada línea del interior del conoide, desde el comienzo al final, representa una reacción completa posible compatible con el esquema de reacción, así como con la fórmula de la tasa de formación de P a partir de A y B.

Describiremos esto con mayor detalle en la

DEFINICIÓN 2.9 Sea $\mathbb{F}$ una función de estado de un sistema concreto σ de la clase K, y sea $S_{\mathbb{L}}(K)$ el correspondiente espacio de estados legal. Luego,

(i) la trayectoria completa del punto de estado $\mathbb{F}(t)$ en $S_{\mathbb{L}}(K)$ se llama *historia* total de σ durante $\tau \subseteq T$:

$$h(\sigma, \tau) = \{\langle t, \mathbb{F}(t)\rangle \mid t \in \tau\};$$

(ii) el conjunto de *leyes* de los sistemas concretos de la clase K es la familia de todas las historias de todos los sistemas de K durante todos los períodos:

$$\mathbb{L} = \{h(\sigma, \tau) \mid \sigma \in K \ \& \ \tau \in 2^T\},$$

donde 2^T es la familia de todos los períodos de tiempo incluidos en T.

Nos interesan ciertos segmentos de la historia de un sistema químico arbitrario llamados 'reacciones químicas'. De forma equivalente, prestaremos especial atención a los enunciados (fórmulas) de las leyes químicas que se centran en las transformaciones químicas, especialmente a aquellos que ignoran todos los procesos físicos concomitantes. Considérese, por ejemplo, el esquema de sustitución

$$r = \ulcorner A + B \rightharpoonup C + D \urcorner,$$

que, habitualmente, se interpreta así: «Una unidad de la especie A reacciona con otra de la especie B para producir una unidad de la especie C y otra de la especie D». (La interpretación del esquema de reacción más general $m\mathrm{A} + n\mathrm{B} \rightharpoonup p\mathrm{C} + q\mathrm{D}$ es obvia). Este enunciado nada dice acerca del mecanismo de reacción ni de las correspondientes condiciones ambientales. (Éstas se incluyen en el antecedente del enunciado condicional del cual r es el consecuente. Por consiguiente, el condicional íntegro tiene la forma: «Si la presión, la temperatura, etc. son tales y cuales, entonces r».) El enunciado tampoco ofrece información sobre el ritmo del proceso químico: lo único que nos dice es qué hay al comienzo y qué al final de la transformación. Vale decir, sólo se ocupa de sucesos netos. (Además, r es ambiguo; utiliza signos que simbolizan tipos, tales como 'A' y 'B', para referirse a los miembros de esos tipos). En todo caso, así es como puede traducirse el esquema de reacción anterior al lenguaje del espacio de estados: inicialmente, el sistema está en su estado de composición

$$\mathbb{F}_c\,(t_i) = \langle C_\mathrm{A}, C_\mathrm{B}, 0, 0\rangle$$

y, finalmente, en el estado de composición

$$\mathbb{F}_c\,(t_f) = \langle 0, 0, C_\mathrm{C}, C_\mathrm{D}\rangle,$$

por lo que la magnitud del cambio neto es

$$r = \mathbb{F}_c\,(t_i) - \mathbb{F}_c\,(t_f) = \langle C_A, C_B, -C_C, -C_D \rangle.$$

Ejemplo La reacción de fotosíntesis global (que tiene un gran número de pasos intermedios) es

$$6CO_2 + 6H_2O \rightharpoonup C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

Si establecemos

$$\mathbb{F}_c = \langle C_{CO_2}, C_{H_2O}, C_{C_6H_{12}O_6}, C_{O_2} \rangle,$$

obtenemos

$$r = \langle 6, 6, 0, 0 \rangle - \langle 0, 0, 1, 6 \rangle = \langle 6, 6, -1, -6 \rangle.$$

Y la reacción inversa, que (dejando a un lado las diferencias en los pasos intermedios) es la de la respiración, es, desde luego,

$$-r = \langle -6, -6, 1, 6 \rangle,$$

una reformulación, en términos de la teoría de sistemas, de

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightharpoonup 6CO_2 + 6H_2O.$$

Condensaremos lo dicho en el siguiente supuesto semántico. Sea $\mathbb{F}_c$ una función de composición de estado para un sistema químico σ, entre el instante inicial t_i y el instante final t_f (relativos a cierto marco de referencia). Luego,

(i) la *reacción global* o *neta* de σ, entre t_i y t_f, puede representarse mediante la diferencia entre los valores inicial y final de $\mathbb{F}_c$:

$$r = \mathbb{F}_c\,(t_i) - \mathbb{F}_c\,(t_f\,);$$

(ii) mientras que los componentes positivos de r representan los *reactivos*, los negativos representan los *productos de la reacción*;

(iii) la *inversa* de una reacción r es la reacción $-r$;

(iv) la *reacción nula* es $\mathbb{O} = \langle 0, 0, \ldots, 0 \rangle$.

Como sabemos gracias a la química elemental, las reacciones pueden sumarse para formar otras reacciones: véase la Figura 2.4. Por ejemplo, la secuencia (o ruta) de reacciones enzimáticas representadas mediante el sistema de esquemas de reacción

$$\begin{aligned}&\mathrm{A} + \mathrm{C} \rightharpoonup \mathrm{AC}\\&\mathrm{AC} + \mathrm{B} \rightharpoonup \mathrm{ACB}\\&\mathrm{ACB} \rightharpoonup \mathrm{AB} + \mathrm{C}\end{aligned}$$

se suman para dar la reacción global

$$\mathrm{A} + \mathrm{B} \rightharpoonup \mathrm{AB}.$$

En nuestra representación del espacio de estados formamos la función de estado de composición

$$\mathbb{F}_c = \langle C_\mathrm{A}, C_\mathrm{B}, C_\mathrm{C}, C_\mathrm{AB}, C_\mathrm{AC}, C_\mathrm{ACB}\rangle,$$

de tal forma que las sucesivas reacciones son

$$\begin{aligned}r_1 &= \langle 1, 0, 1, 0, 0, 0\rangle - \langle 0, 0, 0, 0, 1, 0\rangle = \langle 1, 0, 1, 0, -1, 0\rangle\\r_2 &= \langle 0, 1, 0, 0, 1, 0\rangle - \langle 0, 0, 0, 0, 0, 1\rangle = \langle 0, 1, 0, 0, 1, -1\rangle\\r_3 &= \langle 0, 0, 0, 0, 0, 1\rangle - \langle 0, 0, 1, 1, 0, 0\rangle = \langle 0, 0, -1, -1, 0, 1\rangle.\end{aligned}$$

La reacción global se forma mediante la suma de las coordenadas término por término:

$$r = r_1 + r_2 + r_3 = \langle 1, 1, 0, -1, 0, 0\rangle,$$

la cual, efectivamente, representa $\ulcorner A + B \rightharpoonup AB \urcorner$. Vale decir, el catalizador C y los productos intermedios se cancelan, por lo que en la reacción global aparecen únicamente los reactivos consumidos y las nuevas sustancias formadas. Si el resultado neto hubiera sido un retorno al estado inicial del sistema, hubiéramos tenido una reacción global nula.

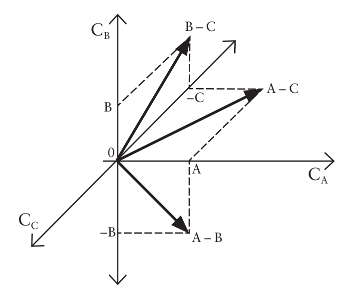


Figura 2.4. Las reacciones A ⇀ B y B ⇀ C constituyen la reacción global A ⇀ C. Cada reacción está representada por una flecha en el espacio cartesiano tridimensional de las concentraciones (o de los números de átomos o moléculas).

Resumiremos lo dicho en la

DEFINICIÓN 2.10 Sean las m-tuplas

$$r_1 = \langle a_1, b_1, \ldots, m_1 \rangle, \qquad r_2 = \langle a_2, b_2, \ldots, m_2 \rangle$$

cada una de las cuales representa una reacción de un sistema químico dado. Luego, la *suma* de las dos reacciones en el mismo sistema es otra reacción representada por

$$r = r_1 + r_2 = \langle a_1 + a_2,\ b_1 + b_2, \ldots, m_1 + m_2 \rangle.$$

Puesto que, en principio, cada reacción posee una inversa, que dos reacciones cualesquiera que ocurren en un sistema químico dado pueden sumarse para formarse una tercera reacción y que la reacción nula se suma a toda reacción dejándola sin cambios, tenemos (Aris, 1965) el

TEOREMA 2.1 Sea R el conjunto de reacciones químicas que pueden ocurrir en un sistema químico dado, sea + la operación binaria de suma de reacciones, sea – la operación unaria de inversión de reacciones y sea $\mathbb{O}$ la reacción nula. Luego, la estructura $\mathcal{R} = \langle R, +, -, \mathbb{O} \rangle$ es un grupo.

Ahora bien, mientras que algunas reacciones son simultáneas, otras son sucesivas. La noción de sucesión de reacciones es obvia:

DEFINICIÓN 2.11 Sea $\langle R, +, -, \mathbb{O}\rangle$ el grupo de reacciones posibles en un sistema químico y llamemos

$$r_i = \mathbb{F}_c(t_i) - \mathbb{F}_c(t_f), \qquad r_j = \mathbb{F}_c(t'_i) - \mathbb{F}_c(t'_f)$$

a los dos miembros de R. Luego, r_i *precede* a r_j en el tiempo, sii r_j se inicia después de r_i. Vale decir,

$$r_i < r_j =_{df} t'_i \geq t_f.$$

Este concepto forma parte de una noción de especial interés para la química de los sistemas vivientes, a saber, la de ruta [o vía]. Una ruta es un conjunto de reacciones, tal que el producto de una de ellas es el reactivo de la siguiente. Más precisamente, formulamos la

DEFINICIÓN 2.12 Sea $\langle R, +, -, \mathbb{O}\rangle$ el grupo de reacciones posibles en un sistema químico y llamemos

$$R_n = \langle r_i \in R \mid i \in \mathbb{N}\rangle$$

a una lista de n miembros de R. Luego, R_n es una *ruta* [*vía*] o *secuencia de reacciones* sii para cada valor de i que se presenta en R_n,

(i) r_i precede en el tiempo a r_{i+1}, es decir, $r_i < r_{i+1}$, y

(ii) algunos de los productos de la reacción r_i son reactivos de r_{i+1}.

Para concluir esta subsección, es justo advertir al lector que hay formas alternativas de representar los compuestos químicos y sus reacciones, en particular, las propuestas por Aris (1965), Sellers (1967, 1970, 1971), Krohn, Langer y Rhodes (1967) y Feinberg (1972). Todas estas representaciones diferentes admiten la notación química habitual, la cual no distingue entre las sustancias químicas individuales (por ejemplo, las moléculas) y sus especies, y escriben, por ejemplo, 'H_2O' tanto para la molécula de agua como para la especie química agua. Otra ambigüedad de la notación química usual es que cuando «leemos» (interpretamos) un esquema de reacción tal como ⌜$A + B \rightharpoonup C + D$⌝, se nos pide que consideremos que el primer '+' simboliza la combinación de los reactivos y que el segundo '+' simboliza la mezcla de productos de la reacción. Por estas razones, la notación química ortodoxa es un paradigma de doble discurso: de platonismo y de materialismo. En con-

secuencia, hemos tenido que hacerlo a nuestro modo, aun cuando desde el punto de vista matemático sea menos sofisticado.

1.5. El control químico

Todo sistema es controlado [regulado] por su entorno; en particular, el medio de un sistema químico constituye una desigual fuente, y sumidero, de sustancias químicas y energía. Si el entorno es «apto», el sistema químico emergerá y subsistirá por un tiempo. En cambio, un entorno «hostil» –por ejemplo, uno que proporciona energía en exceso o lo hace escasamente, no contiene agua suficiente o es demasiado oxidante (como Marte)– impedirá ciertas reacciones o, incluso, todas ellas. Por consiguiente, la existencia de un sistema químico es una condición suficiente para la existencia de un entorno «amigable», vale decir, un ambiente compatible con las reacciones que están teniendo lugar en el sistema.

Además de los controles externos o ambientales, ciertos sistemas químicos poseen controles internos. Es decir, algunos reactivos, o algunos productos, de un sistema químico contribuyen a regular el ritmo de las reacciones, con frecuencia hasta el extremo de iniciarlos o detenerlos. En algunos casos, una reacción se acelera a causa de la acción de un catalizador (por ejemplo, de una proteína enzimática). En particular, el propio producto de la reacción puede catalizarla (*autocatálisis*). En otros casos, a medida que el producto de la reacción se acumula inhibe el avance de la misma hasta detenerla, aun cuando la provisión de reactivos no se haya agotado (*inhibición por producto final*). También es posible que el propio catalizador sea descompuesto por otra enzima, como en el caso en que una proteína ya no es «necesaria». Además, diversos procesos de diferentes clases pueden tener lugar de forma secuencial (en particular, de forma cíclica), e incluso al mismo tiempo, en el mismo sistema, por ejemplo, en una célula viviente (cf. Eigen, 1971; Lehninger, 1975).

Nos interesan especialmente los sistemas químicos que poseen controles, porque las células vivientes y sus orgánulos pertenecen a esta clase. Por consiguiente, los definiremos de forma explícita:

DEFINICIÓN 2.13 Un sistema químico con una función de estado de composición $\mathbb{F}_c = \langle F_1, F_2, \ldots, F_m \rangle$ (en cierta representación) es *autocontrolado*

[o *autorregulado*] sii algunos de los componentes de $\mathbb{F}_c$ dependen de manera exclusiva de otros componentes de la misma función de estado de composición (en lugar de depender de componentes de la $\mathbb{F}$ total que representa las propiedades del entorno del sistema).

Considérese, por ejemplo, una reacción enzimática en una solución acuosa; el proceso bioquímico típico. Sea E que denota una enzima que actúa sobre cierto sustrato S para formar un compuesto intermedio ES (o complejo enzima-sustrato), el cual finalmente se disocia en un producto P, con liberación de E. Además, supóngase que se trata de una reacción de inhibición por producto final, vale decir, de una reacción en la cual el producto obstaculiza la propia reacción porque se une a la enzima, con lo cual inhibe la acción de esta última sobre el sustrato. En la notación química convencional, tenemos

$$\begin{array}{ccccccc} E + S & \underset{k'_1}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} & ES & \underset{k'_2}{\overset{k_2}{\rightleftharpoons}} & EP & \underset{k'_3}{\overset{k_3}{\rightleftharpoons}} & E + P \\ t_1 & & t_2 & & t_3 & & t_4 \end{array}$$

donde las dos últimas constantes de reacción son comparables, es decir, $k_3 \approx k'_3$. Dejaremos al lector la tarea de representar las seis reacciones mediante nuestra notación del espacio de estados. En este momento, sólo nos interesa hacer hincapié en que la composición de nuestro sistema es variable y que se trata de un sistema autorregulado, además de lo cual, es autoacelerado durante ciertos períodos y autodesacelerado durante otros. El sistema puede diagramarse como un sistema controlado ordinario: véase la Figura 2.5.

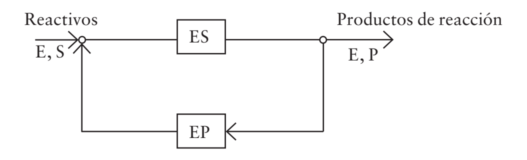


Figura 2.5. Un sistema químico autorregulado de tipo de realimentación negativa. El producto P de la reacción se combina con el catalizador E para formar el compuesto intermedio EP, con lo cual se reduce la velocidad de las reacciones que van de izquierda a derecha.

Los sistemas de control de esta clase quedan englobados por la

teoría general del control. Sin embargo, los sistemas químicos autorregulados no coinciden con los actuales paradigmas populares de sistema de control, a saber, el volante de inercia, el termostato y el misil autodirigido. En efecto, en estos casos, lo que efectúa la regulación es un subsistema separable. Además, la totalidad del sistema posee componentes fijos y, habitualmente, se supone que su comportamiento es lineal. Dado que es posible separarlo del sistema que controla, un sistema de regulación de esta clase puede estudiarse aparte y no sólo como un componente de la totalidad del sistema autorregulado. En cambio, si del sistema químico representado en la Figura 2.5 se removiera la enzima o el producto de la reacción, el sistema dejaría de ser químico: se transformaría en un sistema físico. Segundo, por la definición de sistema químico, su composición no es constante, sino que varía a lo largo del tiempo. Tercero, la mayoría de las ecuaciones cinéticas químicas –en particular aquéllas de la tasa de formación de ES a partir de los reactivos– no son lineales. Estas tres peculiaridades de los sistemas químicos autorregulados parecen haber impedido que la mayor parte de los científicos y los ingenieros los reconociera como sistemas y, por ende, que utilizaran el enfoque de la teoría de sistemas para tratar los problemas químicos.

2. Los sistemas bioquímicos

2.1. La biomolécula

Llamaremos *biomolécula* a toda macromolécula que, como una proteína o un ácido nucleico, sea esencial para algún proceso característicamente biológico, tal como la división celular, la morfogénesis o el desarrollo. Además, llamaremos *bioquímico* a todo sistema, natural o artificial, en el cual se formen o se descompongan biomoléculas. Hay miríadas de clases de procesos de este tipo, y algunas de ellas culminan con la formación de subsistemas de células vivientes, tales como los ribosomas: véase la Figura 2.6.

Las moléculas claves son las proteínas y los ácidos nucleicos: como solía decir Szent-György, mientras que las primeras se encargan de los asuntos de la vida, los segundos son sus guardianes. Ambos son polímeros (Definición 2.4 (iii)). Mientras que los componentes (monómeros)

de los ácidos nucleicos son nucleótidos, principalmente de ocho clases diferentes, las proteínas están formadas por aminoácidos, de los cuales 20 especies se encuentran habitualmente en las bioproteínas. Las biomoléculas son, pues, macromoléculas, y están constituidas por un número tal de unidades que pueden alcanzar tamaños y pesos considerables. A causa de su gran longitud, son muy sensibles a las perturbaciones ambientales. En consecuencia, su estabilidad requiere condiciones ambientales físicas bastante constantes. En una primera aproximación, algunas de esas moléculas se pueden modelizar como cadenas muy largas con la capacidad de plegarse para formar partículas empaquetadas de forma muy apretada. (Cf. Vol′kenshtein, 1970; Lehninger, 1975; Watson, 1976).

Tomaremos prestadas de la química las nociones de nucleótido y aminoácido. También tomaremos de ella este postulado: mientras que los ácidos nucleicos están formados por ocho especies de nucleótidos, las proteínas incluyen 20 clases de aminoácidos. (Ignoraremos aquellas proteínas que no están presentes en los seres vivos). Más precisamente, incorporaremos a nuestra ontología el siguiente axioma bioquímico:

POSTULADO 2.3. La familia *M* de especies moleculares contiene ocho especies de mononucleótidos y 20 especies de aminoácidos.

Cada uno de los miembros de la familia de los mononucleótidos está compuesto por ácido fosfórico, un azúcar y una base nitrogenada. Hay dos géneros de nucleótidos: los ribonucleótidos y los desoxirribonucleótidos. Estos géneros difieren entre sí por la clase de azúcar que contienen: los primeros tienen ribosa, mientras que los segundos contienen desoxirribosa. (Una molécula de ARN es un polímero de componentes del tipo ribo y una molécula de ADN es una sarta de unidades de la clase desoxirribo). A su vez, hay cuatro especies de ribonucleótidos y otras cuatro de desoxirribonucleótidos.

Las bases nitrogenadas de mayor interés biológico son la adenina (A), la guanina (G), la citosina (C), el uracilo (U) y la tiamina (T). Las primeras cuatro se combinan con la ribosa y el ácido fosfórico para formar los ribonucleótidos, o constituyentes del ARN.

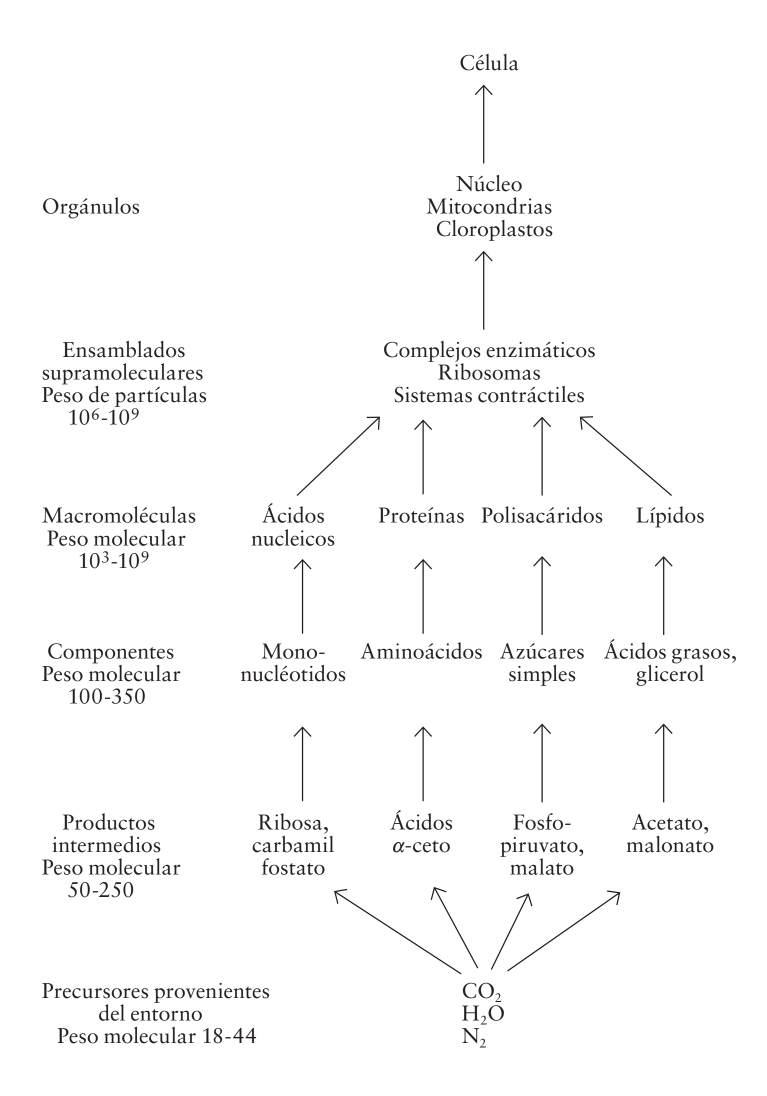


Figura 2.6. Procesos de composición que se inician con moléculas sencillas del entorno y acaban en células vivientes. A partir de Lehninger (1975).

$$a = \text{AMP}, \quad g = \text{GMP}, \quad c = \text{CMP}, \quad u = \text{UMP}.$$

('AMP' es una forma abreviada de escribir 'adenosín monofosfato'. Los otros tres casos son los análogos para guanina, citosina y uracilo respectivamente). En cambio, las bases nitrogenadas A, G, C y T se combinan con la desoxirribosa y el ácido fosfórico para formar los desoxirribonu-

cleótidos, o constituyentes del ADN:

$$a' = \text{dAMP}, \qquad g' = \text{dGMP}, \qquad c' = \text{dCMP}, \qquad t' = \text{dTMP}.$$

En resumen, hay dos conjuntos de unidades (monómeros) a partir de las cuales se forman los polinucleótidos o ácidos nucleicos:

Ribonucleótidos $R = a \cup g \cup c \cup u$
Desoxirribonucleótidos $D = a' \cup g' \cup c' \cup t'$.

A continuación, caracterizaremos los ácidos nucleicos y, en primer lugar, los miembros de la familia del ADN. Comenzaremos con los componentes del conjunto $D = a' \cup g' \cup c' \cup t'$ y formaremos el conjunto de todas las sartas o secuencias posibles de miembros de D, con la única restricción de que la composición de cada compuesto sea igual a la unión de las composiciones de sus constituyentes o precursores. Vale decir, si x e y pertenecen a D, y se combinan para formar $z = xy$, luego $\mathscr{C}_A(z) = \mathscr{C}_A(x) \cup \mathscr{C}_A(y)$, donde '$\mathscr{C}_A(u)$' simboliza la composición atómica de u. (Cf. Capítulo 1, Sección 1.2). El conjunto nuevo, D^*, formado por los miembros de D, contiene todas las combinaciones concebibles, con las repeticiones y las permutaciones, de los desoxirribonucleótidos. En particular, D^* contiene todos los polinucleótidos que forman las moléculas de ADN, así como sartas monótonas tales como $xn = xxx \ldots x$, con $x \in a'$. Limitaremos nuestra atención a aquellas moléculas que contienen los cuatro nucleótidos, es decir, a los miembros de a', g', c' y t'.

Llamaremos D_4^* al subconjunto de D^* formado por las sartas que contienen los *cuatro* desoxirribonucleótidos, en todo número y localización posibles, tales como $wxyz$, $zxwyx$, $yywxxyzzz$, donde $w \in a'$, $x \in g'$, $y \in c'$ y $z \in t'$. El conjunto D_4^* contiene todos los componentes de todas las moléculas de ADN que necesitamos tener en cuenta, tanto las que son reales como las que sólo son posibles. La estructura de D_4^* es la de semigrupo. Más precisamente, $\mathscr{D}_4 = \langle D_4^*, \cdot \rangle$ es un subsemigrupo del semigrupo libre $\mathscr{D} = \langle D^*, \cdot \rangle$ generado por D.

Las moléculas de ADN están constituidas por hebras dobles de cosas de la clase D_4^*. Estas hebras dobles están acopladas de tal forma que cada base A de una de las hebras está apareada con una base T de la otra; asimismo, cada base C está apareada con una base G de la otra hebra.

Por consiguiente, propondremos el

POSTULADO 2.4 Sea $\mathscr{D} = \langle D^*, \cdot \rangle$ el semigrupo libre generado por el conjunto $D = a' \cup g' \cup c' \cup t'$ de desoxirribonucleótidos mediante la operación · de combinación química, sometido a la condición de que para todo x e y pertenecientes a D^*, si $z = xy$, luego $\mathscr{C}_D(z) = \mathscr{C}_D(x) \cup \mathscr{C}_D(y)$. Además, llamemos $\mathscr{D}_4 = \langle D_4^*, \cdot \rangle$ al subsemigrupo formado por aquellas secuencias que contienen moléculas de las cuatro clases pertenecientes a D. Hay sistemas compuestos por dos cadenas de moléculas de D_4^*, cuya estructura incluye la biyección $p : D \rightarrow D$, tal que para todo $x_A \in a'$, $x_G \in g'$, $x_C \in c'$ y $x_T \in t'$,

$$p(x_A) = x_T,\ p(x_C) = x_G,\ p(x_G) = x_C,\ p(x_T) = x_A.$$

DEFINICIÓN 2.14 Los sistemas caracterizados por el Postulado 2.4 se llaman *moléculas de ADN*.

Comentario Suponemos que una sarta arbitraria de moléculas que satisface el Postulado 2.4 no es sólo una sarta formal, sino un compuesto químicamente posible. La justificación de esta hipótesis es que no hay restricciones conocidas para la composición de nucleótidos ni de los compuestos de carbono (y hasta de boro) en general. En pocas palabras y utilizando la notación de la Sección 1.2, $D_4^{**} = D_4^*$.

Procederemos de manera similar con las moléculas de ARN, que están constituidas por mononucleótidos de las especies a, g, c y u:

POSTULADO 2.5 Sea $\mathscr{R} = \langle R^*, \cdot \rangle$ el semigrupo libre generado por el conjunto $R = a \cup g \cup c \cup u$ de los ribonucleótidos y llamemos $\mathscr{R}_4 = \langle R_4^*, \cdot \rangle$ al subsemigrupo formado por aquellas secuencias que contienen moléculas de las cuatro clases pertenecientes a R. Todo miembro de R_4 es una *molécula de ARN* posible.

La unión de todas las clases de moléculas de ADN y ARN constituye la totalidad de los *ácidos nucleicos*:

$$N = D_4^* \cup R_4^*.$$

El caso de las proteínas es semejante. Ahora los componentes son los aminoácidos o, mejor dicho, algunos aminoácidos, tales como la glicina o NH_2CH_2COOH. Más precisamente, los *aminoácidos proteicos*

forman el género

AA = Ala ∪ Arg ∪ Asn ∪ Asp ∪ Cys ∪ Gln ∪ Glu ∪ Gly ∪ His ∪ Ile ∪ Leu ∪ Lys ∪ Met ∪ Phe ∪ Pro ∪ Ser ∪ Thr ∪ Trp ∪ Tyr ∪ Val.

Este conjunto posee la propiedad de semigrupo bajo la operación · de combinación química. Además, la estructura $\mathscr{AA} = \langle AA^*, \cdot \rangle$, en la cual AA^* es el conjunto de todas las sartas (o secuencias) posibles de miembros de AA, es el *semigrupo libre generado por AA*. Los miembros de este grupo se llaman *polipéptidos*, y a los más largos les llamamos *proteínas*. Por lo general, una proteína contiene al menos un miembro de cada especie incluida en AA. Sin embargo, hay importantes excepciones a esta regla. En consecuencia, no podemos restringir nuestra atención al subsemigrupo formado por aquellas secuencias de aminoácidos que contienen representantes de las 20 clases de aminoácidos proteicos.

Resumiremos lo dicho en el

POSTULADO 2.6 Sea $\mathscr{AA} = \langle AA^*, \cdot \rangle$ el semigrupo generado por el conjunto AA de los aminoácidos proteicos. Todo miembro de AA^* es un *polipéptido* posible.

DEFINICIÓN 2.15 Una *proteína* es un polipéptido compuesto por, al menos, 100 aminoácidos. El símbolo para el conjunto de las proteínas es $\mathscr{P}$.

Se estima que existen por lo menos 10.000 clases de proteínas en las células de los organismos contemporáneos. Aproximadamente la mitad de ellas son enzimas, vale decir, reguladores de las reacciones.

Los Postulados 2.3 y 2.6 implican el

COROLARIO 2.1 (i) Las diferencias entre las distintas clases de moléculas de ADN consisten en diferencias en la composición o en el orden (secuencia) de los desoxirribonucleótidos (miembros de D);

(ii) las diferencias entre las distintas clases de moléculas de ARN consisten en diferencias en la composición o en el orden (secuencia) de los ribonucleótidos (miembros de R);

(iii) las diferencias entre las distintas clases de proteínas consisten en diferencias en la composición o en el orden (secuencia) de los 20 aminoácidos proteicos (miembros de AA).

La moléculas que tienen la misma composición pero diferente es-

tructura –en particular, los polímeros que sólo difieren en la posición relativa de sus monómeros componentes en la cadena– se llaman *isómeros*. Un polímero constituido por n monómeros distintos posee 1.2. … n isómeros.

Hasta aquí llegamos con la composición y la estructura de los ácidos nucleicos, así como de las proteínas. A continuación, nos ocuparemos de su formación y su descomposición.

2.2. Duplicación del ADN, y síntesis del ARN y las proteínas

Los ácidos nucleicos no son únicamente el material de la herencia: se supone que controlan todo lo que ocurre en la célula, desde la síntesis de proteínas hasta la división celular. Por consiguiente, los estudiaremos con mayor detalle, especialmente el modo en que emergen y la manera en que controlan la síntesis de proteínas. Sin embargo, estamos obligados a simplificar, aun hasta el extremo de descuidar las diferencias entre las tres clases diferentes de ARN (ARN ribosómico, ARNm y ARNt).

La molécula de ADN típica está compuesta por dos cadenas de polinucleótidos enrolladas una alrededor de la otra, que forman el que se ha convertido en el microsistema más conocido: la doble hélice. Ésta tiene la proverbial propiedad de autoduplicación. El proceso incluye la gradual separación de las hebras, cada una de las cuales funciona como molde o plantilla para la formación de una hebra complementaria, a partir de las moléculas que pululan en el rico medio celular. La unión de estas moléculas se activa mediante enzimas. El proceso global está capturado en el

POSTULADO 2.7 La duplicación de una molécula de ADN es un proceso por el cual la molécula se une a otras moléculas de su entorno-D, E, y forma dos moléculas de ADN. En otras palabras, la estructura de una molécula de ADN contiene una función

$$\rho: D_4^* \times 2^E \longrightarrow D_4^* \times D_4^*$$

tal que $\rho(d, e) = \langle d', d'' \rangle$, con $d, d', d'' \in D_4^*$, $e \in 2^E$ y $\mathscr{C}_D(d), \mathscr{C}_D(d'), \mathscr{C}_D(d'') \in 2^E$.

Tal como hemos mencionado anteriormente, las moléculas de ADN

controlan su propia reproducción, es decir, son sus propias plantillas. Pero no son los únicos sistemas moleculares que actúan como plantillas: las moléculas de ARN funcionan como plantillas en la síntesis de las proteínas. En consecuencia, debemos dilucidar la noción de plantilla. Véase la Figura 2.7.

DEFINICIÓN 2.16 Sea $\tau \in T$ un sistema concreto de la clase T y sea E un conjunto de cosas del entorno de τ. Supongamos que τ preexiste a otro sistema σ de la clase Σ. Además, llamemos i_T a la función identidad en T y $\mathscr{C}_A : \Sigma \to 2^E$ a la función de composición atómica que asigna a cada sistema (ensamblado) σ su composición atómica $\mathscr{C}_A(\sigma) = e \in 2^E$. Luego, f es una *función formadora* de σ y τ una *plantilla* para σ (o *plantilla-*σ) sii

(i) $f = i_T \times \mathscr{C}_A : T \times \Sigma \to T \times 2^E$, tal que

$$f(\tau, \sigma) = \langle \tau, e \rangle \qquad \text{para } \tau \in T, \sigma \in \Sigma, \mathscr{C}_A(\sigma) = e \in 2^E;$$

(ii) los contornos de τ y σ tienen formas complementarias.

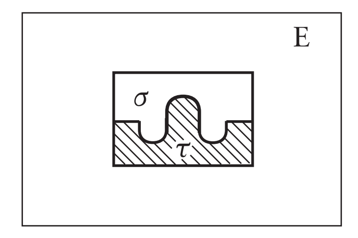


Figura 2.7. El sistema τ es una plantilla-σ, vale decir, τ proporciona una especie de molde para el ensamblaje (por ejemplo, la síntesis) de σ a partir de entidades del entorno.

Desde luego, las *plantillas moleculares* son moléculas que poseen la capacidad de actuar como plantillas para la formación de otras moléculas. Entre estas moléculas están las de ADN y ARN: las primeras son autoplantillas, así como plantillas para moléculas de ARN; éstas, a su vez, son plantillas para las proteínas. Esto es parte de una hipótesis sólidamente confirmada, mal llamada dogma central de la biología molecular, que se resume en los diagramas heurísticos de la Figura 2.8. En ella, las flechas de trazo continuo representan la «transferencia de in-

formación» que tiene lugar en todas las células, mientras que las flechas de trazo discontinuo representan el «flujo de la información secuencial» que tiene lugar en algunas células.

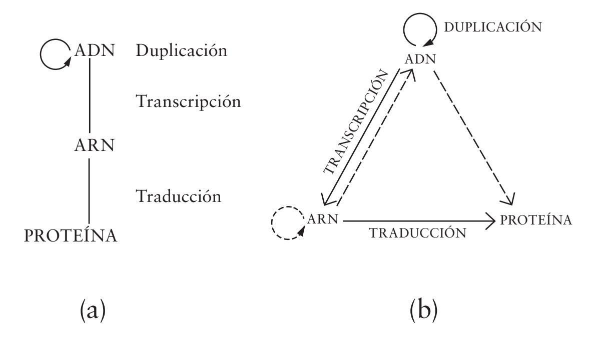
En consecuencia, para comenzar, supondremos el

POSTULADO 2.8 La síntesis de ARN es un proceso en el cual una molécula de ADN (plantilla) se une a nucleótidos de su entorno y da como resultado la misma molécula (plantilla) y, además, una molécula de ARN. Vale decir, la estructura de una molécula de ADN contiene una función

$$s_R = i_{D_4^*} \times \mathscr{C}_A : D_4^* \times R_4^* \rightarrow D_4^* \times 2^E,$$

en la cual $i_{D_4^*}$ es la función identidad sobre D_4^* y $\mathscr{C}_A$ es la función de composición $\mathscr{C}_A$: $R_4^* \rightarrow 2^E$, tal que

$$s_R\ (d, r) = \langle d, e \rangle \qquad \text{para } d \in D_4^*, r \in R_4^*\ \mathscr{C}_A(r) = e \in 2^E.$$



(a) (b)

Figura 2.8. Dos versiones del «dogma central». (a) La versión estándar (por ejemplo, Watson, 1976). (b) Una versión alternativa (Crick, 1970). Para una traducción de la expresión metafórica 'flujo de información' al lenguaje no metafórico de la química cuántica, aguárdese varias décadas.

La duplicación de ADN y la síntesis de ARN son procesos químicos, por supuesto, ya que en ambos casos una tanda de reactivos (el conjunto *e* de precursores que «nada» en la solución ambiental) se combina en el producto de la reacción. Además, la totalidad del sistema es un quimiosistema autorregulado, dado que los dos procesos están regulados por

las moléculas de ADN. Sin embargo, estas moléculas no actúan como controles químicos comunes (por ejemplo, como enzimas), sino como plantillas: la suya es una química de plantillas. (Lo mismo vale para la regulación que efectúan las moléculas de ARN en la síntesis de proteínas). Éste es el motivo de que los procesos resumidos en los Postulados 2.7 y 2.8 no se representen mediante ecuaciones de reacción corrientes, y de que hayamos introducido las funciones ρ (de duplicación del ADN) y s_R (de síntesis de ARN). Pero ésta es precisamente una de las peculiaridades de los bioquimiosistemas, a diferencia de los quimiosistemas puros.

Otra peculiaridad de los bioquimiosistemas es su capacidad para sintetizar biomoléculas y, en particular, proteínas. Como se recordará de la Definición 2.14, una proteína es un compuesto de aminoácidos y, más particularmente, un miembro del conjunto AA^* de sartas, o secuencias, que contienen aminoácidos (proteicos) de todas las clases. Una vez más, la síntesis de proteínas está regulada por moléculas ARN que actúan como plantillas. Más precisamente, establecemos el

POSTULADO 2.9 La síntesis de proteínas es un proceso por el cual una molécula de ARN (plantilla) se une a aminoácidos de su entorno E y da como resultado la misma molécula junto con una molécula de proteína. Vale decir, la estructura del ARN contiene la función

$$s_P = i_{R_4}{}^* \times \mathscr{C}_A : R_4^* \times AA^* \to R_4^* \times 2^E,$$

en la cual $\mathscr{C}_A : AA^* \to 2^E$, tal que

$$s_P\,(r, p) = \langle r, e \rangle,$$

donde $r \in R_4^*$, $p \in \mathscr{P} \subset AA^*$, $\mathscr{C}_A(p) = e \in 2^E$.

Este axioma sólo describe el proceso global: no nos dice cuáles segmentos de la molécula de ARN corresponden a determinados aminoácidos en la secuencia que caracteriza la proteína dada. La estructura fina –pero de ningún modo el mecanismo– de esta correspondencia, está dada por el mal llamado *código genético*. Este «código» no es otra cosa que la correspondencia detallada entre los nucleótidos de la plantilla de ARN y los aminoácidos de la molécula sintetizada en ella. Pasemos a describir esta correspondencia.

Sea $R = a \cup g \cup c \cup u$ el conjunto de los ribonucleótidos que forman

las moléculas de ARN en R_4^* (recuérdese el Postulado 2.5). Éste es el conjunto de sartas (o secuencias) que contienen ribonucleótidos de cada una de las cuatro bases nitrogenadas y, en consecuencia, todos los tripletes posibles de ellas, por ejemplo, *uca*, *uuc* y *gcg* entran en la composición de los miembros de R_4^*. Llamemos R_3^* al conjunto $4^3 = 64$ tripletes, llamados *codones*. Véase la Figura 2.9.

A continuación, tomemos el conjunto AA de los 20 aminoácidos proteicos, vale decir, los componentes de las proteínas. El «código» genético completo es la función que asigna a cada codón (triplete de nucleótidos de la molécula de ARN) un aminoácido determinado de una proteína. (Cf. Watson, 1976).

Reformularemos lo dicho mediante una convención y un axioma:

DEFINICIÓN 2.17 Sea R_3^* el conjunto de 64 tripletes de nucleótidos pertenecientes a $R = a \cup g \cup c \cup u$, tal que para todo $x \in R_3^*$ existe un segmento $y \in R_4^*$ de una molécula de ARN para la cual $x \sqsubset y$ (x es parte de y). Todo miembro de R_3^* es un *codón*.

POSTULADO 2.10 La correspondencia codón-aminoácido (o ARN-proteína) es la función parcial $\pi : R_3^* \to AA$ que

(i) asigna a cada codón, salvo al inicial y al terminal, un aminoácido de una proteína. Vale decir, con las excepciones mencionadas, si $r \in R_3^*$, luego, $\pi(r) = a \in AA$, donde $a \sqsubset p$ y $p \in \mathcal{P}$ es una proteína;

(ii) preserva el orden: vale decir, si $r, r' \in R_3^*$, y r precede a r' en una secuencia de codones dada, luego $\pi(r)$ precede a $\pi(r')$.

En la literatura aparece de forma implícita una función f diferente, a saber, una función que asigna a cada aminoácido un codón, es decir, $f : AA \to R_3^*$, donde $'f(a) = \text{r}'$, para $a \in AA$ y $\text{r} \in R_3^*$, se interpreta '*r codifica a*'. Sin embargo, se ha descubierto experimentalmente que diferentes codones pueden «codificar» el mismo aminoácido. (Vale decir, el «código» es degenerado, o de muchos a uno, por consiguiente no es un código propiamente dicho que permita descifrar un mensaje cifrado). En otras palabras, esa función f que va de AA a R_3^* no existe, por lo cual la «traducción» inversa de la estructura de la proteína a las estructuras del ARN es imposible.

Hebra de ARN *aaugcuuaaaccgggauu...*

Tripletes (*aau*)(*gcu*)(*uaa*)(*acc*)(*ggg*)(*auu*)...

Figura 2.9. La secuencia de nucleótidos de la molécula de ARN, cuando actúa como plantilla para la síntesis de proteínas, está organizada en tripletes (codones). La clase y la posición de cada aminoácido en la proteína están determinadas por la composición y la posición del codón correspondiente.

Un auténtico código es una correspondencia entre dos conjuntos de señales *artificiales* y, más particularmente, *lenguajes* (cf. Birkhoff y Bartee, Capítulo 8). Las funciones de codificación y descodificación de los códigos, cuando no tienen errores, son funciones uno a uno, no de muchos a uno como π. En consecuencia, el uso del concepto lingüístico de código en química es metafórico. Lo mismo sucede con las expresiones 'las plantillas que dan instrucciones a (o codifican) la síntesis de proteínas' y 'las instrucciones genéticas contenidas en un gen'. Que todas éstas son analogías, se hace manifiesto por los siguientes hechos. Primero, un sistema de información auténtico es un sistema compuesto por un emisor, un receptor y, entre ellos, un canal de información; en un sistema químico no hay tales componentes de forma manifiesta. Segundo, los cálculos de la cantidad de información supuestamente encerrada en un trozo de material genético (es decir, en un segmento de una molécula de ADN) son falsos; tanto es así que no aparecen en ningún enunciado legal biológico y todo el mundo da su estimación arbitraria preferida. Por estas razones, el lenguaje propio de la teoría de la información que se utiliza en la biología molecular es un accesorio heurístico que ya ha agotado su capacidad heurística. Además, constituye un obstáculo para la transformación del «dogma central» en un sistema hipotético-deductivo que explique la síntesis y la duplicación de los ácidos nucleicos, así como la síntesis de proteínas, en términos exclusivamente físicos y químicos, en lugar de describirlas en términos analógicos, tales como 'molécula que almacena información', 'flujo de información', 'transcripción' y 'traducción'.

Adviértase, finalmente, que al igual que las aplicaciones presentadas anteriormente en esta sección –a saber, ρ (la duplicación del ADN), s_R (la síntesis del ARN) y s_P (la síntesis de proteínas)– π no está definida en el Postulado 2.10, el cual caracteriza toda una clase de tales funciones. Sin embargo, a diferencia de ρ, s_R y s_P, π se conoce en detalle: en efecto, está dada por la tabla que resume el llamado código genético. Lo que

todavía no se conoce es el origen del «código». Tampoco se sabe si los ácidos nucleicos siempre han sido «usados» para sintetizar proteínas.

2.3. Los sistemas bioquímicos

Un sistema bioquímico puede caracterizarse como un sistema en el cual se sintetizan y descomponen biomoléculas. Un ribosoma y un reactor para la síntesis de insulina son sistemas bioquímicos. En cambio, una membrana celular es un quimiosistema puro porque no está involucrado en la producción ni en la desintegración de biomoléculas.

Nuestra caracterización explícita es la

DEFINICIÓN 2.18 Un sistema σ es un *sistema bioquímico* (o *bioquimiosistema*) sii es un sistema químico autorregulado, tal que

(i) la composición de σ incluye proteínas o ácidos nucleicos;

(ii) el entorno de σ contiene todos los precursores de los componentes de σ y, además, es compatible con los procesos de síntesis de proteínas o de ácidos nucleicos;

(iii) los componentes de σ intercambian cosas y energía con el entorno (vale decir, σ es semiabierto) y, además, algunos de ellos participan en las reacciones que tienen lugar en σ;

(iv) la estructura de σ contiene la función de síntesis (o la de descomposición) de proteínas, de duplicación de ADN o de síntesis de ARN.

Las reacciones de un sistema químico pueden detenerse, finalmente, a causa del agotamiento de los reactivos o como resultado de su inhibición por el producto final. En cambio, si el entorno lo permite, un bioquimiosistema es capaz de mantener sus reacciones o de pasar a reacciones alternativas gracias a la depredación de su entorno y al autoensamblaje de sus catalizadores (enzimas) y, finalmente, también de sus plantillas. De hecho, en un sistema bioquímico tienen lugar constantemente dos clases de procesos: (*a*) la composición o autoensamblaje de moléculas complejas a partir de precursores más simples (*anabolismo*) y (*b*) la descomposición o desintegración de sustancias químicas complejas (*catabolismo*). Además, estos dos procesos son interdependientes: los procesos de descomposición necesitan enzimas que, para empezar, deben ser sintetizadas, y esas síntesis, con frecuencia, dependen de otras enzimas que actúan como intermediarios en los procesos de descom-

posición. Además, los procesos anabólicos consumen energía que es liberada, principalmente, por los procesos catabólicos. En resumen, los sistemas bioquímicos son característicamente metabólicos. Refinaremos esta noción mediante la

DEFINICIÓN 2.19 Si σ es un sistema bioquímico, luego

(i) el *metabolismo intermedio* de σ es el conjunto de todas las reacciones enzimáticas en las que sólo participan los componentes de σ;

(ii) el *metabolismo* de σ es el conjunto de todas las reacciones químicas en las que participan los componentes de σ y el entorno de σ.

Algunos componentes celulares son bioquimiosistemas metabólicos. Sin embargo, se supone que los precursores de los primeros organismos de la Tierra, y posiblemente en otras partes, fueron sistemas bioquímicos extracelulares, y que las primeras células emergieron del autoensamblaje o la unión de algunos de esos sistemas bioquímicos. Además, en ocasiones se conjetura que los precursores inmediatos de las células pueden haber sido sistemas que contenían tanto proteínas como ácidos nucleicos. Si bien no tenían todas las propiedades de las células contemporáneas, esos sistemas sí poseían sus principales propiedades emergentes, a saber, las capacidades de metabolizar, autorreproducirse y mutar. (Cf. Küppers, 1975). Pero nos ocuparemos del problema del origen de la vida en el siguiente capítulo.

2.4. Comentarios finales

En este capítulo hemos distinguido tres clases de sistemas que habitualmente se confunden: físicos, químicos y bioquímicos. Véase la Figura 2.10.

Los sistemas químicos se diferencian de los sistemas puramente físicos por el hecho de que algunos de sus componentes participan constantemente en reacciones, en el curso de las cuales se consumen algunas sustancias químicas, a la vez que se producen otras. Por consiguiente, los sistemas químicos son un paradigma de las cosas que cambian de forma cualitativa. No se trata de que en los sistemas físicos no ocurran cambios cualitativos: la emisión y la absorción de luz son cambios cualitativos, y también lo son la fisión y la fusión nucleares, así como los cambios de estado de agregación. Sin embargo, es posible hacer que un gran número de sistemas físicos sean inmunes al cambio cualitativo

durante cierto tiempo. En contraposición, un sistema químico es, por definición, un sistema cuya composición cambia sin cesar, de forma tal que finalmente se transforma en algo cualitativamente diferente de lo que era al comienzo. El que esos cambios puedan explicarse, por lo menos en principio, con ayuda de teorías físicas –aunque no únicamente con éstas– no los convierte en procesos físicos. Lo que aquí nos interesa son las cuestiones ontológicas, no las gnoseológicas: las distinciones de niveles objetivas, no la comprensión de los niveles superiores con el auxilio del conocimiento acerca de los inferiores.

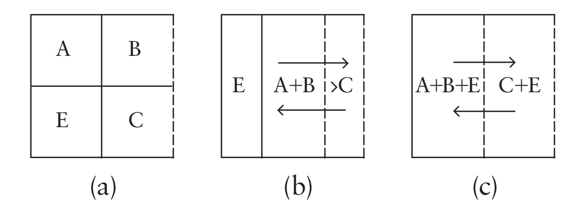


Figura 2.10. Tres clases de sistemas: (*a*) sistema físico con cuatro componentes no reactivos; (*b*) sistema químico con componente no reactivo (E); (*c*) sistema bioquímico: todos los componentes reaccionan y uno de ellos (E) es una enzima o catalizador proteico. Mientras que los sistemas físicos y químicos pueden ser casi completamente cerrados (línea continua) o abiertos en ciertos aspectos, los sistemas bioquímicos deben ser semiabiertos (línea punteada), dado que depredan su entorno.

Los sistemas bioquímicos son el asiento de cambios cualitativos aun más profundos y continuos. No sólo participan en todas las reacciones químicas de siempre, sino también en reacciones cuyo resultado es el autoensamblaje y autodesensamblaje de moléculas inmensas (a menudo, millones de veces más grandes que las moléculas inorgánicas). Además, algunas de estas reacciones involucran plantillas, objetos que no aparecen en las reacciones químicas ordinarias. Por último, los sistemas bioquímicos tienen una actividad continua gracias a sus enzimas y pueden obtener por sí mismos provisiones del entorno. A causa de estas propiedades, los sistemas bioquímicos se parecen mucho a los biosistemas.

Las diferencias entre sistemas físicos, químicos y bioquímicos no

son sólo diferencias en complejidad: son importantes diferencias cualitativas, tan grandes, en realidad, que justifica el hablar de diferentes niveles: del físico, el químico y, tal vez, también del nivel bioquímico. Desde luego, no debemos olvidar que todos los sistemas bioquímicos son sistemas químicos y que éstos, a su vez, están compuestos por sistemas físicos: de lo contrario, no conseguiremos explicar la bioquímica con ayuda de la química, ni ésta con el auxilio de la física. Con todo, no debemos exagerar las semejanzas en desmedro de las diferencias, en particular, si tenemos la expectativa de comprender un salto cualitativo más: el que va de los sistemas bioquímicos a los biosistemas. Efectuemos ese salto.

Capítulo 3

La vida

Durante mucho tiempo la vida ha constituido un misterio con el que han prosperado los traficantes de misterios. Ya no es así: los biólogos están comenzando a entender lo que hace funcionar a los organismos y los médicos ya empiezan a manipular los sistemas de control responsables de tal funcionamiento, el cual, dicho sea de paso, no es como el de un reloj. Este conocimiento no podría llegar si los organismos se estudiaran o bien exclusivamente en su propio nivel (enfoque holístico), o bien como sistemas físicos carentes de propiedades emergentes (reduccionismo) o, en cualquiera de los dos casos, aparte de su historia. Debemos atribuir el mérito de haber transformado el misterio de la vida en el problema de la vida –el de su origen y su mantenimiento, su evolución y su extinción– a la teoría de la evolución y la biología molecular.

Hemos llegado a comprender que muchas de las peculiaridades de los organismos tienen raíces moleculares. Así pues, la división celular, un suceso típicamente biológico, es resultado de un proceso químico. Además, ahora sabemos que otras propiedades y procesos biológicos –tales como los de la emergencia mediante el autoensamblaje a partir de unidades no vivientes y el de estar sometido a la selección natural– son propiedades compartidas por todos los sistemas vivos. (Recuérdese el Capítulo 1, Sección 3.2). En otras palabras, nos hemos percatado de que esos organismos son sistemas compuestos por sistemas químicos y de que, además, han evolucionado a partir de cosas pertenecientes a niveles inferiores. Ello sugiere el plan de este capítulo: partiremos de los

sistemas bioquímicos, que estudiamos en el Capítulo 2 y poseen ciertas propiedades emergentes, para obtener biosistemas; además, examinaremos algunas peculiaridades de la adaptación y la evolución biológicas.

El producto de nuestro estudio será una combinación de pluralismo (o emergentismo) ontológico con un reduccionismo gnoseológico moderado. En efecto, asumiremos la perspectiva de que el monismo ontológico –sea mecanicista, sea espiritualista– es falso, porque niega la emergencia de propiedades y leyes novedosas en el paso de los sistemas físicos –a través de los sistemas químicos– a los biosistemas. En cambio, el programa que procura explicar los niveles superiores (más complejos) mediante los inferiores –es decir, el reduccionismo gnoseológico– ya ha probado su fertilidad y es congruente con la biología contemporánea. En efecto, ésta –en particular la biología molecular y la biología evolutiva– explica la vida sin desembarazarse del problema, y lo hace sirviéndose de la química, aunque no en términos exclusivamente químicos.

1. Del quimismo a la vida

1.1. La autoorganización de los sistemas bioquímicos

Según la biología contemporánea, (*a*) los organismos modernos descienden, en última instancia, de biosistemas primitivos (protocélulas) y (*b*) éstos, por su parte, emergieron a partir de sistemas bioquímicos, los cuales evolucionaron a partir de biomoléculas. (Véase Oparin, 1968; Miller y Orgel, 1974; Oró, Miller, Ponnamperuma y Young, 1974). A su vez, todas las biomoléculas son compuestos de carbono, todos los cuales además contienen hidrógeno y oxígeno, y, en la mayoría de los casos, también nitrógeno. Esto no es accidental: de los ciento y tantos elementos que existen, el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno y el oxígeno forman las moléculas más estables y, con mucho, la mayor variedad de ellas. También el boro posee la capacidad de formar moléculas largas y estables, pero es mucho menos común que los otros cuatro elementos, los cuales existen casi en todas partes de la región explorada del universo.

Además, las condiciones físicas necesarias para la síntesis de biomoléculas –tales como abundancia de energía solar y humedad, así como temperaturas y presiones moderadas– han existido durante aproximadamente 4000 millones de años en nuestro planeta. Por otra parte, es

razonable conjeturar que la atmósfera primitiva era reductora en lugar de oxidante, y por ello resultaba favorable, antes que hostil, al autoensamblaje de biomoléculas y de sistemas compuestos por ellas. En tales circunstancias, no sorprende que se tuvieran que formar biomoléculas y que finalmente se combinaran para constituir sistemas de mayor tamaño. En resumen, el nuestro «es el mejor de todos los entornos posibles para la vida» (Henderson, 1913, pág. 273); o por lo menos es uno de los diversos entornos adecuados para el origen y el mantenimiento de la vida. Con esto no queremos decir que el surgimiento de la vida haya sido inevitable: los científicos sólo afirman que era posible (vale decir, legal en lugar de milagroso). Además, puesto que las condiciones para la emergencia de la vida son bastante estrictas, probablemente son bastante excepcionales, por lo que la «probabilidad» de que haya ocurrido, exactamente del mismo modo, en algún otro lugar debe ser insignificantemente pequeña. En consecuencia, aunque es muy probable que haya organismos extraterrestres, es improbable, al menos en el caso de los más complejos de ellos, que se parezcan a los que conocemos (Jacob, 1977).

Hasta hace poco se suponía que la formación de sistemas bioquímicos a partir de hidrógeno, carbono, oxígeno y nitrógeno había abarcado eones. El motivo es que se daba por sentado que el autoensamblaje sólo podía ocurrir mediante el encuentro al azar y simultáneo de todos los átomos que componen un sistema bioquímico. En efecto, tales sucesos son tan improbables que se los puede descartar. Aun cuando el azar siempre está presente –especialmente en las disociaciones químicas– las reacciones químicas de composición y sustitución son producto de enlaces químicos, frente a los movimientos aleatorios tendentes a la desorganización propios de los átomos y las moléculas de los alrededores. (Sin duda, hay aleatoriedad en las colisiones mismas que producen los compuestos químicos, pero éstos son inestables y, en consecuencia, de corta vida, a menos que los átomos se mantengan unidos mediante enlaces interatómicos. Por consiguiente, el azar dentro de los sistemas se opone al azar del entorno. Y aun las disociaciones causadas por movimientos térmicos aleatorios pueden tener como resultado productos de reacción que son, a su vez, reactivos que finalmente forman sistemas más estables).

En la actualidad, sabemos que los sistemas químicos y bioquímicos no pueden hacer otra cosa que autoensamblarse por la acción de vínculos de diversas clases. Más aún, sabemos que es más probable que esos procesos de autoensamblaje tengan lugar por etapas que de un pluma-

zo. En particular, la formación de las proteínas primitivas puede haber ocurrido en dos etapas: la síntesis de aminoácidos seguida de la polimerización. Por consiguiente, los primeros sistemas bioquímicos, y hasta los primeros organismos, pueden haberse formado, en nuestro planeta y en otros sitios, en cuanto aparecieron las condiciones necesarias. Esto explica el breve intervalo de tiempo transcurrido entre el origen de las rocas y la aparición de las primeras bacterias y algas verdiazules.

En cuanto como se ensamblaron, las biomoléculas ya podían asociarse con otras para formar moléculas de mayor tamaño y sistemas transmoleculares. Entre los sistemas más simples de esta última clase, están las partículas coloidales. Por ejemplo, una molécula de proteína en una solución acuosa atrae cierto número de moléculas de agua y forma un complejo coloidal hidrófilo. A su vez, varios de estos sistemas pueden unirse para formar un coacervado: véase la Figura 3.1. En ambos casos, el sistema resultante es una cosa diferente, distinta de su medio líquido y con una estructura propia (Oparin, 1968). Presuntamente, los ácidos nucleicos pueden formar sistemas parecidos. En particular, una molécula de ADN colocada en una solución de nucleótidos y ácidos nucleicos adecuada tal vez inicie la síntesis de moléculas de ARN, el cual a su vez regularía la síntesis de proteínas, así como la de otras moléculas de ADN. Más aún, alrededor de ese sistema ADN-ARN-proteínas se podría autoensamblar una bicapa de moléculas lipídicas. Esta membrana semipermeable aumentaría la concentración de biomoléculas y, con ello, el ritmo de las reacciones bioquímicas, además de que impediría la entrada de agentes perjudiciales (por ejemplo, de agentes disociadores). Esto haría posible la ocurrencia de nuevas reacciones, las cuales finalmente tendrían como resultado la formación de nuevas clases de biopolímeros y hasta de sistemas transmoleculares, tales como vesículas y orgánulos de diversas clases.

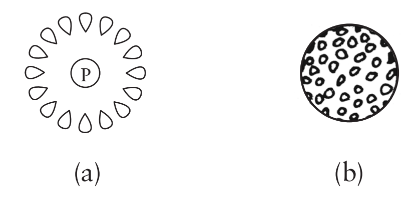


Figura 3.1. El autoensamblaje de partículas coloidales alrededor de una molécula de proteína (P) en una solución acuosa (*a*) y la unión de partículas coloidales para formar un coacervado (*b*).

Dadas las biomoléculas en un medio adecuado, la formación de orgánulos tales como los cloroplastos y los ribosomas no tiene nada de milagroso. En efecto, un ribosoma, por ejemplo, no es un sistema tan increíblemente complicado: consta de 58 macromoléculas, tres de las cuales son moléculas de ARN y el resto proteínas de diferentes clases. Lo que el ribosoma hace –su función– es, principalmente, sintetizar proteínas a partir de los precursores presentes en su entorno.

El siguiente paso, desde luego, es el autoensamblaje de unos cuantos sistemas transmoleculares para formar células, independientemente de cuán primitivas sean y, en consecuencia, de su ineficiencia y su poca adaptación. Lo demás es historia: historia evolutiva, impulsada por la mutación y la selección. En resumen, el proceso de emergencia de la vida puede haberse parecido al representado en la Figura 3.2.

El diagrama condensa lo que tienen en común las diversas hipótesis rivales referentes al autoensamblaje de las células primitivas. (Véase Florkin, 1960; Oparin, 1968; Fox y Dose, 1972; Miller y Orgel, 1974; Oró, Miller, Ponnamperuma y Young, 1974). Se están acumulando rápidamente pruebas que indican que la mayoría de los procesos de desarrollo representados en la Figura 3.2 han tenido lugar en nuestro planeta y, por lo menos los primeros pasos, también en otras partes. En particular, el análisis de rocas precámbricas, de meteoritos y, recientemente, de algunos objetos celestes, ha revelado aminoácidos, ácidos grasos y hasta ácidos nucleicos.

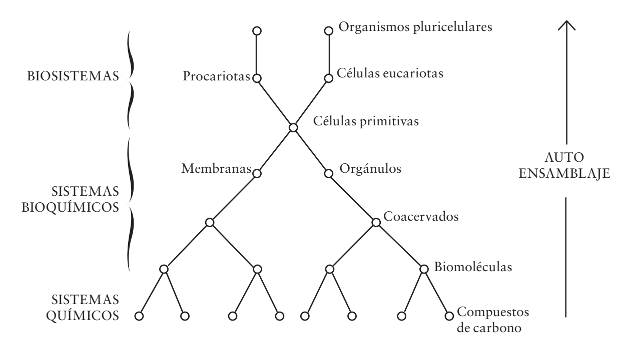


Figura 3.2. El autoensamblaje paso a paso de los organismos, a partir de compuestos de carbono.

Resumiremos y generalizaremos lo dicho hasta aquí en el

POSTULADO 3.1 Sea $\Sigma = \langle \Sigma_i \mid 1 \leq i \leq n \rangle$ una secuencia de especies de sistemas realmente (nomológicamente) posibles, tal que los sistemas de la clase Σ_i están compuestos de sistemas de la clase Σ_{i-1}. Luego, todo sistema real pertenece a la secuencia Σ y se ha autoensamblado en el término inmediatamente precedente de la secuencia.

1.2. La definición de biosistema

Hemos llegado al momento en que podemos listar las propiedades que creemos necesarias y suficientes para considerar que un sistema es una cosa viviente. Supondremos que un organismo es un sistema tal que

(i) su *composición* incluye proteínas (tanto estructurales como funcionales, en particular enzimáticas, y éstas habilitan al sistema para utilizar su entorno), así como ácidos nucleicos (los cuales suscitan su reproducibilidad y la semejanza de su descendencia);

(ii) su *entorno* incluye los precursores de todos sus componentes (y, por tanto, posibilita que el sistema efectúe el autoensamblaje de la mayoría, si no todas, sus biomoléculas);

(iii) su *estructura* incluye las capacidades para metabolizar, autorrepararse y reproducirse.

Expondremos con mayor detalle esta hipótesis por medio de un axioma y una convención. He aquí el primero:

POSTULADO 3.2 Existen sistemas de la clase *B*, tal que para cada miembro *b* de *B*

(i) *b* está compuesto por subsistemas químicos y bioquímicos (y, que, en consecuencia, metabolizan);

(ii) *b* incorpora algunas de las biomoléculas que sintetiza (en lugar de liberarlas en su entorno);

(iii) las actividades posibles de *b* incluyen (*a*) el reordenamiento, el ensamblaje y la descomposición de sus componentes; (*b*) la sustitución de los componentes no funcionales y la eliminación o neutralización de ciertas sustancias químicas; (*c*) la captación y el almacenamiento (en partículas de ATP, glicógeno y grasa) de energía libre para su consumo futuro;

(iv) *b* puede acomodarse a algunos cambios ambientales;

(v) *b* es un componente de un supersistema (organismo) o de una población de sistemas de la misma clase;

(vi) algunos de los subsistemas de *b* son capaces de reproducir ciertas partes de *b*;

(vii) algunos de los subsistemas de *b* regulan algunos de los procesos que tienen lugar en *b*, de tal forma que el sistema mantiene un medio interno (*milieu intérieur*) bastante constante;

(viii) todos los sistemas de control de *b* están interconectados mediante señales (difusión de compuestos químicos, propagación de reacciones químicas, señales eléctricas, etc.), por lo cual constituyen una red de señales o de información;

(ix) uno de los sistemas de control de *b* (su sistema genético o genoma) está compuesto por moléculas de ácidos nucleicos, es peculiar de *b* y controla el desarrollo y la reproducción de *b*;

(x) los descendientes de *b* son semejantes a *b*, pero pueden poseer algunas características propias (por mutación o por recombinación génica);

(xi) *b* compite en ciertos aspectos con otros sistemas de la misma (y de diferente) especie, y coopera con ellos en otros aspectos diferentes;

(xii) *b* desciende directa o indirectamente de sistemas bioquímicos que carecen de algunas de las propiedades enumeradas aquí, y sus moléculas de ácidos nucleicos conservan indicios (y, con ello, cierto registro) de la ascendencia de *b*;

(xiii) *b* dura, como miembro de *B*, un intervalo de tiempo limitado.

El nombre de los *B* no debería sorprender al lector:

DEFINICIÓN 3.1 Los sistemas *B* a los que se refiere el Postulado 3.2 se llaman *biosistemas* o *cosas vivientes*.

Sin duda, los biosistemas poseen más propiedades que las que acabamos de listar, pero éstas nos parecen necesarias y suficientes para distinguir los biosistemas terrestres de las cosas de otras clases. En particular, la cláusula (ii) muestra una de las peculiaridades de los biosistemas, en contraste con los sistemas no vivientes. De hecho, en el laboratorio es posible ensamblar sistemas capaces de sintetizar biomoléculas que no proceden a formar componentes celulares, tales como orgánulos y membranas, ni mucho menos células. Expresado en forma metafórica y, por consiguiente, no científica: una característica del metabolismo de los biosistemas es que, en lugar de ser «indiferente», o de «autoservirse», «sirve» al organismo como totalidad. (Aquí no hay teleonomía: los sistemas que no metabolizan de este modo no aprueban: o no viven o

están enfermos). Asimismo, la cláusula (iii): un sistema no viviente (por ejemplo, uno bioquímico) no necesita contar con un servicio de autolimpieza y autorreparación: puede acumular compuestos que inhiban sus reacciones (por ejemplo, sustancias tóxicas) y que, finalmente, hagan cesar algunas o hasta todas sus reacciones.

Adviértase que en la cláusula (xi) no sólo hemos incluido la competencia, el núcleo del darwinismo, sino también la cooperación. Desde luego, en la enorme mayoría de los casos la cooperación no es deliberada, vale decir, no consiste en la solidaridad, pero eso no la hace menos real. Sin la involuntaria cooperación de plantas, animales y otros organismos, puede que la atmósfera terrestre no fuera muy diferente a como era en los comienzos, es decir, alrededor de 5000 millones de años atrás: para empezar, aún podría ser reductora, en lugar de oxidante. Nótese también una peculiaridad de la herencia en los biosistemas [cláusula (xii)]. Al igual que otros sistemas complejos, tales como las estrellas, las montañas y los artefactos, los biosistemas dejan ver las huellas de su pasado. Pero a diferencia de los sistemas no vivientes, los biosistemas concentran sus archivos en una diminuta parte de sí mismos, a saber, su genoma.

No todas las funciones (propiedades, procesos y actividades) que atribuimos a un organismo son realmente realizadas por éste durante su historia vital. Así pues, el metabolismo y la división celular pueden quedar suspendidos temporalmente, como ocurre en el caso de las esporas y las semillas dormidas. Algunas de las propiedades de los sistemas son, por ende, disposiciones, o propiedades potenciales, que pueden actualizarse en condiciones ambientales favorables. (Para la noción de potencialidad, véase el Capítulo 4 del Volumen 3).

No hemos incluido algunas propiedades que los biosistemas poseen de manera evidente –y que, en consecuencia, a menudo se incluyen en la lista de sus propiedades definitorias– porque también son comunes a todos los sistemas bioquímicos y hasta a algunos sistemas físicos. Entre ellas están (*a*) tener una frontera más o menos definida que los separa de su entorno y (*b*) estar sometidos a la selección natural. Es obvio que muchos sistemas macrofísicos no vivientes comparten la primera propiedad. En cuanto a la segunda, el Postulado 1.6 se la atribuye a todos los sistemas.

Por último, adviértase que, de acuerdo con la Definición 3.1, los cromosomas no están vivos porque no metabolizan y los ribosomas no lo

están porque no se duplican. Asimismo, los virus no son seres vivientes, porque no funcionan en absoluto fuera de una célula huésped; tanto es así que los virus independientes son, con frecuencia, cristales. (El que sí está vivo es el sistema compuesto por un virus y una célula). Tampoco los robots, sin importar cuán complejos sean, cumplen las condiciones para ser biosistemas, aunque sólo fuera porque están hechos de componentes mecánicos y eléctricos, en lugar de bioquímicos. Un par de propiedades, independientemente de su importancia, no basta para caracterizar un biosistema; el sistema de 13 propiedades incluido en el Postulado 3.1 es necesario y suficiente... hasta nuevo aviso.

1.3. La célula y el organismo, la bioespecie y la biopoblación

Para comenzar, estudiemos en mayor detalle una característica de los biosistemas que resulta de particular interés filosófico, a saber, su composición celular. Para identificar la menor unidad de materia viviente, así como la de la vida, utilizaremos los conceptos de biosistema (Definición 3.1) y de componente de un sistema (Definición 1.2).

DEFINICIÓN 3.2 (i) Llamamos *célula* a todo biosistema de cuyos componentes ninguno es un biosistema. En símbolos obvios:

$$x \in C =_{df} x \in B \,\&\, \forall\, y\, (y \in \mathscr{C}(x) \Rightarrow y \notin B);$$

(ii) la *composición celular* de un biosistema es el conjunto de células que lo componen:

$$x \in B \Rightarrow \mathscr{C}_C(x) =_{df} \mathscr{C}(x) \cap C, \quad \text{donde } \mathscr{C}(x) = \{y \in \Theta \mid y \sqsubset x\};$$

(iii) un *organismo* es una célula o un biosistema pluricelular que no es un subsistema propiamente dicho de un biosistema:

$$x \in O =_{df} x \in C \vee x \in B \;\&\; (\mathscr{C}_C(x) \subset C \,\&\, \neg(\exists y)$$
$$(y \in B \,\&\, x \prec y).$$

Comentario 1 La intersección de *C* y *O* es el conjunto de los organismos unicelulares. *Comentario 2* Dos sinónimos útiles de *C* y *O* son,

respectivamente, *nivel celular* y *nivel organísmico*. *Comentario 3* De acuerdo con la definición anterior, la parte viviente de un arrecife de coral puede considerarse un organismo. *Comentario 4* Si bien se trata de un sistema, un cultivo bacteriano no es un biosistema; en realidad, se trata de una biopoblación. *Comentario 5* Se ha afirmado que se podría considerar que los organismos son o bien «clases de células», o bien «partes de especies biológicas» (Hull, 1974, pág. 48). Ambas disyuntas son falsas. Las clases, especialmente las bioespecies, son conjuntos y, por ende, conceptos, mientras que los organismos son cosas y, más particularmente, sistemas concretos. Una cosa puede ser miembro ($\in$) de un conjunto y parte ($\sqsubset$) de otra cosa: no puede ser parte de un conjunto ni miembro de una cosa y ello es así por las definiciones de las relaciones de composición [membresía] y parte-todo.

Ahora estamos en condiciones de definir el concepto de bioespecie. Lo desarrollaremos con ayuda de la noción de clase natural (Volumen 3, Capítulo 3, Sección 3.5) según lo determinan un puñado de leyes naturales y el concepto de descendencia (Definición 1.17):

DEFINICIÓN 3.3 Una especie es una *bioespecie* sii

(i) es una clase natural (en lugar de una colección arbitraria);

(ii) todos sus miembros son organismos (presentes, pasados o futuros);

(iii) desciende de otra clase natural (biótica o prebiótica).

Comentario 1 Esta definición evita las dificultades que plagan algunas de las confusas nociones de bioespecie que se encuentran en la literatura biológica y biofilosófica. En particular, no ponemos como condición el aislamiento reproductivo, ya que no es pertinente para los organismos que carecen de reproducción sexual y naufraga en los casos de los híbridos –vegetales y animales– que son fértiles. *Comentario 2* No confundimos la especie con el biosistema, como han hecho, incluso, algunos prominentes biólogos. (Por ejemplo, Dobzhansky, 1970, pág. 354: «La especie está compuesta por individuos del mismo modo que un individuo está compuesto de células, o una colonia de termitas u hormigas se compone de miembros fértiles y estériles»). Como todas las demás especies, la bioespecie es un conjunto y, por consiguiente, un concepto, sólo que no se trata de un conjunto arbitrario, sino de uno que está definido por cierta colección de leyes. Además, una bioespecie no es un conjunto carente de estructura, sino un conjunto parcialmente orde-

nado por la relación de descendencia. Pero una especie no es un sistema concreto porque (*a*) no todos sus miembros comparten el mismo entorno [o ambiente] y (*b*) sus miembros pasados y futuros no están acoplados a sus miembros presentes. *Comentario 3* En razón de la cláusula (iii) de la Definición 3.3, los organismos que finalmente pudieran ser sintetizados en el laboratorio no pertenecerían a una bioespecie sino más bien a una bioespecie artificial.

Por último, ocupémonos de tres bioentidades que no son ni individuos ni conjuntos de individuos:

DEFINICIÓN 3.4 Un sistema es

(i) una *biopoblación* sii está compuesto por individuos de la misma bioespecie;

(ii) una *comunidad* o *ecosistema* sii se compone de diversas poblaciones de organismos que interaccionan y pertenecen a diferentes bioespecies;

(iii) una *biosfera* sii es el mayor sistema en el cual participa un biosistema dado.

Comentario 1 En las definiciones de biopoblación y ecosistema es habitual incluir el uso de un territorio o hábitat común, tal como un pantano o el dosel de un árbol. En nuestro caso, esto resulta innecesario, porque hemos definido esas entidades como sistemas concretos: no lo serían a menos que hubiera vínculos entre sus componentes, y tales vínculos sólo son posibles si los individuos en cuestión no están separados. *Comentario* 2 Tampoco es necesario especificar el planeta al definir la noción general de biosfera: nuestra definición es válida para cualquier planeta, pero no lo es para el conjunto de los ecosistemas de todos los planetas posibles, porque ese conjunto no es un sistema concreto.

1.4. Los bioniveles

Hemos distinguido, en forma más o menos explícita, seis diferentes niveles bióticos, a saber, los de célula, componente vivo de un organismo, organismo, población, ecosistema y biosfera. Conviene listarlos de manera explícita a los fines de futuras consultas:

B_1 = *nivel celular* = el conjunto de todas las células
B_2 = *nivel de los órganos* = el conjunto de todos los órganos
B_3 = *nivel organísmico* = el conjunto de todos los organismos
B_4 = *nivel poblacional* = el conjunto de todas las poblaciones
B_5 = *nivel ecosistémico* = el conjunto de todos los ecosistemas
B_6 = *nivel de las biosferas* = el conjunto de todas las biosferas.

La familia *ß* = {B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6} ejemplifica el concepto de estructura de niveles (Definición 1.8). Por consiguiente, el conjunto *ß* con la relación de precedencia de nivel merece tener su propio nombre:

DEFINICIÓN 3.4 El conjunto *ß* de los niveles bióticos, junto con la relación $<$ de precedencia de nivel, vale decir, $\mathcal{B} = \langle ß, < \rangle$, es la *estructura de bioniveles*.

A $\mathcal{B}$ también se le ha llamado *scala naturae* y *jerarquía* de la vida. Se trata de nombres desafortunados: se supone que una escalera propiamente dicha lleva a alguna parte y que una jerarquía en toda regla supone una relación de dominio o subordinación, y ése no es el caso de $\mathcal{B}$.

Ahora bien, los niveles bióticos que hemos incluido en *ß* no son los únicos lógicamente posibles. En particular, se puede imaginar la existencia de organismos subcelulares; más aún, ocasionalmente se ha afirmado que tales biosistemas existen. Supondremos que todo lo viviente y todo lo que está compuesto por seres vivos pertenece a *ß*:

POSTULADO 3.3 Todo biosistema y todo sistema compuesto por biosistemas pertenece a algún nivel de la estructura de bioniveles $\mathcal{B} = \langle ß, < \rangle$.

Esta versión de la «organización jerárquica» de la vida es estática: trata de los niveles y de su orden, pero no de su origen. Sin embargo, en la actualidad, la mayoría de los biólogos afirmaría que los niveles bióticos son etapas de un proceso evolutivo: que todo bionivel ha surgido en forma espontánea a partir del nivel precedente (biótico o prebiótico). En realidad, no necesitamos otro axioma para incorporar y refinar este supuesto, porque no es otra cosa que una especificación del Postulado 3.1:

COROLARIO 3.1 Todo sistema concreto que pertenece a un bionivel dado se ha autoensamblado a partir de cosas del nivel precedente.

A su vez, una consecuencia directa de este corolario es que todo sis-

tema de un nivel dado es precedido en el tiempo por sus componentes o precursores. Por consiguiente, la precedencia de niveles y la precedencia en el tiempo, aunque no son cointensivas, sí son coextensivas. Ahora la estructura de bioniveles ya no es estática: se ha convertido en parte de una ontología que no sólo es pluralista, sino también evolucionista. Los bioniveles no son capas estáticas amontonadas unas sobre otras. Se suceden en el tiempo (dicho metafóricamente) y ello es así en virtud de un mecanismo determinado y ubicuo, a saber, el de autoensamblaje. Además, no se trata de los peldaños de una jerarquía que conduce lentamente del vil átomo, a través del hombre, hacia el Ser Supremo: los niveles no son sino etapas de un proceso evolutivo natural, que puede haber sucedido y, por cierto, puede estar ocurriendo en diversos lugares y épocas de la historia del universo; aunque no dos veces de la misma manera.

1.5. Comentarios finales

Hemos caracterizado los biosistemas como sistemas compuestos por sistemas químicos y bioquímicos. Por consiguiente, en tanto que algunas de las propiedades de los biosistemas pueden rastrearse hasta sus constituyentes bioquímicos, otras son emergentes, o características de los primeros. La propiedad más evidente de esta clase es, desde luego, la de estar vivos, una propiedad derivada, no una básica. Así pues, los cloroplastos y los genes de una célula vegetal son componentes esenciales de ella, pero no están vivos. Tampoco están vivas las biopoblaciones ni las comunidades. En consecuencia, un bosque en el que pululan las plantas, los hongos, los animales y las bacterias no está vivo.

De lo anterior se deduce que el tipo de los biosistemas no está incluido en el tipo de los sistemas bioquímicos, y que el de las biopoblaciones no está incluido en el de los biosistemas. Lo que sostenemos, en cambio, es que los componentes de los miembros del nivel biopoblacional son miembros del nivel de los biosistemas, los cuales a su vez están compuestos por miembros pertenecientes al nivel bioquímico. Esta tesis emergentista es compatible con el programa que se propone explicar lo superior en términos de lo inferior o, en forma más precisa, el sistema en términos de sus componentes (y las interacciones que hay entre ellos). Volveremos sobre estos asuntos en la Sección 4. (Véase también, Bunge, 1977f).

2. Las biofunciones

2.1. La salud y la muerte

Los sistemas, especialmente los organismos, pueden hacer frente a su entorno con éxito diverso: recuérdese, de la Definición 1.14, que la presión selectiva que ejerce el ambiente sobre una población de sistemas de cierta clase es un número que se encuentra entre 0 (éxito total) y 1 (fracaso total). Pero ese concepto de grado de adaptación es colectivo, no específico y fenomenológico: no es aplicable a un biosistema individual ni es fisiológico. Necesitamos un concepto diferente del grado de adaptación de un biosistema dado, no necesariamente de un organismo. He aquí uno:

DEFINICIÓN 3.5 Sea *b* un biosistema en un entorno *e*. Entonces, *b* es *saludable* [*sano*] o *normal* en *e* sii *b*, cuando está en *e*, posee todas las propiedades (puede realizar todas las funciones) listadas en el Postulado 3.1.

Comentario 1 Éste es un concepto fisiológico, no uno estadístico de salud o normalidad. Es posible que toda una población de organismos sanos sea barrida por una catástrofe ambiental, tal como una sequía grave. Y también es posible que la mayoría de los individuos de una biopoblación estén enfermos; un caso de normalidad estadística y anormalidad fisiológica. *Comentario 2* En ocasiones se considera que la enfermedad es una forma de adaptación. Esto sucede en el caso de las enfermedades infecciosas, cuando los organismos sintetizan anticuerpos que «luchan» contra los invasores. Pero no es así en otros casos: la artritis, la obstrucción del canal biliar, un infarto, un accidente cerebrovascular o el estrés nada tienen de adaptativos. Por el contrario, éstos son casos patentes de falta de adaptación. *Comentario 3* Nuestra definición no se limita a los organismos pluricelulares completos: también puede aplicarse a células y a los órganos de un organismo pluricelular. Sin embargo, en tales casos es preferible limitarse a las funciones específicas que tales subsistemas realizan. Más sobre esto en la Sección 2.2.

El concepto de salud dilucidado en la definición anterior es cualitativo. Resulta deseable disponer también de un concepto cuantitativo –del grado– de salud (o enfermedad), así como de salud total (o salud en todos los aspectos). Un candidato obvio es el que sigue: el grado de enfermedad de un biosistema en un entorno dado, en un aspecto determinado y en

un instante dado, es su desequilibrio relativo (o desviación de la norma fisiológica) en ese aspecto y en ese instante dado. Supondremos, con optimismo, que siempre es posible encontrar esos valores, y propondremos la

DEFINICIÓN 3.6 Sea F_i: $B \times E \times T \to \mathbb{R}$ el *i*-ésimo componente de la función de estado de los biosistemas de la clase *B* en los entornos de tipo *E* y sea $\overline{F}_i$ el respectivo valor (fisiológico) normal de F_i. Además, sea $w = \{w_i \in [0, 1] \mid 1 \leq i \leq N\}$ un conjunto de números reales positivos, cuya suma es igual a uno, tal que w_i mide el peso o importancia relativa (para todo el biosistema) de la propiedad representada por la función F_i. (Cf. Volumen 3, Capítulo 2, Sección 4.2, Definición 2.15 de peso de propiedades). Luego,

(i) el *grado de enfermedad* de un biosistema $b \in B$ en el entorno $e \in E$, en el *i*-ésimo aspecto y en el instante $t \in T$, es

$$s_i(b, e, t) = | F_i(b, e, t) - \overline{F}_i | / | F_i(b, e, t) + \overline{F}_i |;$$

(ii) el *grado de salud* del biosistema *b* en el entorno *e*, en el *i*-ésimo aspecto y en el instante *t*, es el complemento de $s_i(b, e, t)$ hasta la unidad, vale decir,

$$h_i(b, e, t) = 1 - s_i(b, e, t);$$

(iii) el *grado total de enfermedad* y el *grado total de salud* de un organismo *b* en *e*, en *t* son, respectivamente,

$$S(b, e, t) = \sum_{i=1}^{N} w_i s_i(b, e, t) \quad \text{y} \quad H(b, e, t) = 1 - S(b, e, t).$$

Los valores de s_i y h_i son números reales en el intervalo unitario. Y cada uno sigue siendo el mismo aunque $F_i(t)$ sea igual a $n\overline{F}_i$ o $(1/n)\overline{F}_i$, donde *n* es un número entero arbitrario.

El interés conceptual de la fórmula anterior reside en que únicamente tiene sentido dentro de un modelo teórico de los biosistemas de la especie de interés. Su interés metodológico radica en que nos recuerda que la medicina científica no es sino un capítulo de la biología (incluida la psicología en el caso del hombre).

Por último, llegamos a la

DEFINICIÓN 3.7 Una cosa está *muerta* sii, habiendo sido un biosistema, ha dejado de realizar todas las funciones listadas en el Postulado 3.1.

Comentario 1 No podríamos definir la muerte como el máximo grado de enfermedad, o el mínimo grado de salud, porque los conceptos de enfermedad y salud se refieren a las cosas vivientes (Definición 3.6). *Comentario 2* Sin duda, no todas las funciones vitales se detienen a la vez: la muerte es un proceso, no un suceso puntual. Sin embargo, no podemos definir el morir como la cesación gradual de las biofunciones, porque la recuperación no es infrecuente, en tanto que la muerte es irreversible. *Comentario 3* Dado que todos los biosistemas surgen a partir de sistemas bioquímicos o hasta de células completas, no de cero (es decir, a partir de entidades físicas), el proceso de morir no es el inverso del proceso de nacer. Véase la Figura 3.3. *Comentario 4* La vida y la muerte no son entidades, sino estados o procesos de los biosistemas. Morir es el proceso de descomposición de un biosistema, a través del cual se convierte en un agregado de compuestos químicos. Se inicia cuando las reacciones bioquímicas que mantienen un estado estacionario –a saber, los procesos metabólicos– se detienen. En particular, ya no se producen nuevas enzimas, necesarias para la síntesis de las biomoléculas y, en general, los procesos de descomposición empiezan a prevalecer sobre los procesos de formación. *Comentario 5* Que la salud y la enfermedad, la vida y la muerte, no son entidades sino estados de ciertas entidades resulta obvio a partir del punto de vista de la teoría de sistemas, pero no desde otros puntos de vista diferentes. En efecto, la enfermedad y la muerte han sido tratadas como entidades, no sólo por los hombres primitivos sino también por algunas escuelas médicas y filosóficas. Tras reificar y hasta personificar la muerte, fue posible considerar la vida ya fuera como una batalla contra La Muerte o como un tránsito hacia ella. Las ansiedades suscitadas por estas concepciones primitivas (incorporadas en el existencialismo contemporáneo) son mitigadas por la doctrina naturalista propuesta por Epicuro, según la cual el morir es el proceso de desintegración de un organismo.

2.2. Las funciones y su valor

Toda célula, sin importar cuán simple o primitiva pueda parecer a primera vista, está compuesta por diversos sistemas bioquímicos de

enorme complejidad, los cuales están ligados unos con otros y se suceden unos a otros de diferentes maneras. Si es eucariota (nucleada), una célula se compone de un núcleo y un citoplasma. El primero está formado por hebras de ADN y ARN, y el segundo por subsistemas tales como los ribosomas, las mitocondrias, los cloroplastos (en el caso de las plantas) y los cilios, ninguno de los cuales es un subsistema viviente.

Cada uno de los subsistemas no vivientes que componen una célula realiza ciertas actividades, llamadas habitualmente 'funciones', tales como almacenar energía, sintetizar proteínas, descomponer las moléculas excedentes, detectar desequilibrios y transmitir señales. De ahí que a estos subsistemas celulares se les llame 'unidades funcionales'. En los organismos pluricelulares (o metazoos) esta división del trabajo también se da entre células y hasta entre grupos de células, tal como sucede en los tejidos y los órganos. En ambos casos, cada subsistema de un biosistema, tanto si el primero es viviente como si no lo es, realiza ciertas funciones, vale decir que hace determinadas cosas que son típicas del subsistema y otras que también realizan subsistemas de otras clases. Por ejemplo, las neuronas no sólo generan y transmiten señales, sino que también sintetizan ATP, ácidos nucleicos y proteínas.

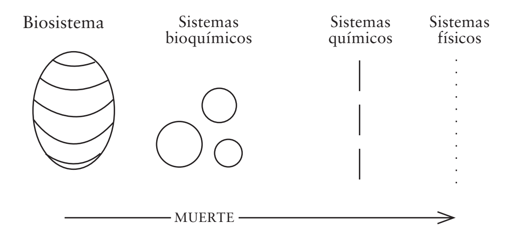


Figura 3.3. Los sucesivos colapsos del espacio de estados de un sistema agonizante: una pérdida gradual de propiedades y sistemicidad.

Dilucidaremos estas nociones mediante la definición siguiente, la cual utiliza la idea de proceso ya dilucidada en la Sección 1.7 del Capítulo 1:

DEFINICIÓN 3.8 Sea b un organismo y $a < b$ un subsistema de b, de la clase $[a]$. Además, llamemos $\pi(a)$ a la totalidad de los procesos o actividades que incluyen a a durante cierto período de tiempo. Luego,

(i) todo subconjunto de $\pi(a)$ que incluya a cualquiera de los procesos listados en el Postulado 3.1 es una *función biológica*;

(ii) las *funciones biológicas específicas* de a son las realizadas por a y los de su clase, pero no otros subsistemas de b. Vale decir,

$$\pi_s(a) = \pi(a) - \bigcup_{x \prec b} \pi(x), \quad \text{con} \quad a \neq x \prec b \;\&\; x \notin [a].$$

Las funciones biológicas de un subsistema que forma parte de un organismo son valiosas o nocivas para el organismo como totalidad. Por ejemplo, las funciones específicas del hígado son sintetizar ciertas sustancias (por ejemplo, albúmina y colesterol) y almacenar otras (por ejemplo, glicógeno y hierro). Ningún mamífero puede vivir sin hígado: el valor de éste para el organismo es máximo, aunque, desde luego, no es mayor que los valores del corazón y el cerebro. En cambio, un mamífero sí puede vivir sin vesícula biliar, aunque este órgano gestiona (almacena, concentra y distribuye) la bilis producida por el hígado, la cual es útil para la digestión de las grasas, entre otras sustancias. Dicho de otro modo, el valor de la vesícula biliar, si bien es positivo, es mucho menor que el del hígado. Finalmente, algunos subsistemas de un organismo realizan funciones biológicas nocivas: piénsese en los tumores.

Lo anterior sugiere la siguiente medida del valor biológico de un subsistema a, que forma parte de un organismo b, situado en un entorno e: el valor de a para b en e es igual al grado de salud de b en e cuando b está provisto de a, menos el grado de salud de b en e cuando b está desprovisto de a. Más precisamente, con ayuda de la Definición 3.6, estipularemos la

DEFINICIÓN 3.9 Sea $H_A : B \times E \times T \rightarrow \mathbb{R}$ la función de salud para los organismos de la clase B, en los entornos de tipo E, cuando los subsistemas de clase A actúan en los B (vale decir, cuando $a \prec b$ y $\pi_S(a) \neq \varnothing$ para $a \in A$ y $b \in B$). Asimismo, llamemos $H_{\bar{A}} : B \times E \times T \rightarrow \mathbb{R}$ a la función de salud correspondiente cuando los A no actúan en los B (vale decir, $\neg(a \prec b)$ o $\pi_S(a) = \varnothing$). Luego, el *valor de A para B en E* es la función

$V : A \times B \times E \times T \rightarrow \mathbb{R}$, tal que para todo $a \in A$, $b \in B$, $e \in E$ y $t \in T$,

$$V(a, b, e, t) = H_A(b, e, t) - H_{\bar{A}}(b, e, t),$$

el cual es el *valor del subsistema a para el organismo b*, *en el entorno e*, *en el instante t*.

Puesto que la salud varía entre 0 y 1, los valores biológicos están comprendidos entre –1 y 1. En particular,

> *a* es *máximamente valioso* para *b*, en *e*, en *t* sii $H_A(b, e, t) = 1$ y $H_{\bar{A}}(b, e, t) = 0$;
> *a carece de valor* para *b*, en *e*, en *t* sii $H_A(b, e, t) = H_{\bar{A}}(b, e, t)$;
> *a* es *máximamente nocivo* para *b*, en *e*, en *t* sii $H_A(b, e, t) = 0$ y $H_{\bar{A}}(b, e, t) = 1$.

Por consiguiente, en los seres humanos, el corazón es máximamente valioso, el apéndice normal carece de valor y un tumor maligno es máximamente nocivo. Además, el valor de otros subsistemas, tales como el sistema reproductivo, el timo y las amígdalas, varía con la edad.

La definición anterior nos permite dilucidar otro concepto, esta vez de especial interés para los cirujanos y los bioingenieros:

DEFINICIÓN 3.10 Dos subsistemas *a* y *a′* de un biosistema dado *b* son *funcionalmente equivalentes* sii

(i) *a* y *a′* realizan las mismas funciones específicas, vale decir, $\pi_S(a) = \pi_S(a')$ y

(ii) *a* y *a′* poseen el mismo valor durante el intervalo de interés, es decir, $V(a, b, e, t) = V(a', b, e, t')$ para *t* y *t′* en el intervalo dado.

Comentario 1 Algunas biofunciones, tales como el metabolismo y la división celular, son comunes a todos los organismos. Otras son especie-específicas. Por ejemplo, la fotosíntesis es característica de las plantas y la síntesis de enzimas que tiene lugar en la digestión de la carne es peculiar de los carnívoros. El agrupamiento de los organismos por grupos de biofunciones proporciona una clasificación tan natural y fundamental como la taxonomía evolucionista; lo que ocurre es que está pasada de moda. *Comentario 2* Cuantas más funciones sea capaz de realizar un organismo, mejor provisto estará para hacer frente a los desafíos del ambiente. En consecuencia, los organismos pluricelulares altamente diferenciados serán seleccionados por los entornos ricos y cambiantes. Además, a causa de que poseen células de recambio, los metazoos están protegidos de la pérdida accidental de algunas células, por lo cual tienen mayores oportunidades de sobrevivir que los organismos

que carecen de esos recambios. (Recuérdese el análisis de la fiabilidad de la Sección 4.1 del Capítulo 1). Estos dos factores contribuyen a explicar la prosperidad de los metazoos en nuestro planeta. En resumen, el entorno terrestre ha sido adecuado para los organismos complejos y versátiles provistos de un elevado grado de redundancia. *Comentario 3* Desde luego, son concebibles definiciones alternativas de valor biológico. Una alternativa que merece la pena tener en cuenta es la que identifica el biovalor con la eficiencia. Otra posibilidad es teleológica: valioso para un organismo (o una especie) *X* es todo aquello que contribuye a que *X* cumpla sus objetivos. No podemos adoptar esta alternativa porque no a todos los organismos les atribuimos actividades orientadas a fines. Incorporaremos las finalidades en el capítulo siguiente, en relación con organismos provistos de sistemas nerviosos complejos. *Comentario 4* A medida que tiene lugar el proceso evolutivo, el valor de algunos subsistemas se incrementa (preadaptación) y el de otros disminuye, a veces hasta el extremo de desaparecer completamente. En este caso, el subsistema puede desaparecer (como ocurre con la pérdida de la capacidad de sintetizar ciertas vitaminas) o puede mantenerse sin función durante cientos de miles de años. Por consiguiente, es posible –y no sólo eso, sino muy probable– que el ser humano posea algunas proteínas, genes, células y hasta sistemas celulares fósiles (carentes de función), vale decir, subsistemas que ya hace tiempo han dejado de cumplir una biofunción. Con todo, se trata de algo muy difícil de probar. *Comentario 5* Resulta igualmente probable que ciertas condiciones patológicas hereditarias hayan sido valiosas en el pasado o se conviertan en condiciones valiosas en el futuro. Éste es el caso de la hemoglobina drepanocítica, que está relacionada con la resistencia a la malaria. Asimismo, en las guerras modernas, ciertas malformaciones congénitas, tales como los pies planos y la vista escasa, les han salvado la vida a muchos hombres. (La guerra favorece a los inadaptados).

2.3. La biorregulación

Todos los sistemas están sometidos al control [la regulación] del entorno. En los sistemas bioquímicos hay, además, una regulación interna, en particular una regulación enzimática. (Recuérdese la Definición 2.17). Como consecuencia, los biosistemas son controlados por

el entorno (especialmente por la disponibilidad de los precursores de las biomoléculas) y por sus subsistemas bioquímicos. En particular, las enzimas y los ácidos nucleicos ejercen controles internos. Además, los organismos pluricelulares poseen sistemas de control adicionales, tales como la regulación del crecimiento y el tamaño que ejercen hormonas específicas. En resumen, todos los organismos están sometidos a dos tipos de control: el interno y el ambiental, o autorregulación y regulación externa.

Naturalmente, la autorregulación de una biofunción se llama biorregulación [o biocontrol]. La mayoría de las biorregulaciones son del tipo de la realimentación [o retroalimentación]. (Véase el Apéndice A, Sección 1.3). En estos casos, si el producto de un subsistema alcanza (o no llega a) cierto valor normal, el sistema de control reduce (o incrementa) la entrada de insumos de tal forma que el desequilibrio se vaya compensando de forma gradual. (Desafortunadamente, en ocasiones se llama conjunto de *estados finales*, o *Sollwerte*, al nivel normal del producto. Sin embargo, no hay pruebas de comportamientos orientados a fines, salvo en los casos de ciertas características del comportamiento de los animales provistos de cerebro: véase el Capítulo 4).

Cuando todos los controles de un organismo funcionan adecuadamente, el organismo alcanza, o mantiene, un estado estacionario u *homeostasis*: el organismo se mantiene en ese estado, o cercano a él, independientemente de las perturbaciones externas, a condición de que éstas se encuentren dentro de ciertos límites. Con todo, por lo general, la homeostasis es el resultado global de una frenética actividad molecular y celular. Además, en la historia de vida de todo organismo hay cierto número de estados no homeostáticos, a saber, aquellos que conducen a la homeostasis y aquellos que parten de ella, tales como los procesos de nacimiento y muerte, de enfermedad (o lesiones) y su correspondiente recuperación. En estos casos, se habla de *homeorresis*.

La biorregulación se inicia en el nivel molecular. Así pues, el ADN controla la síntesis del ARN, el cual, a su vez, regula la síntesis de las proteínas. (Véase la Sección 2.1 del Capítulo 2). Pero el ADN solo, lejos de constituir un primer motor inmóvil, está sometido a un intenso control. De hecho, según la hipótesis de Jacob y Monod, los genes se activan, o expresan, únicamente cuando se levanta ese control. (Probablemente suceda, al menos en los organismos pluricelulares, que un gran número de genes esté reprimido, o inactivo, durante la mayor parte del tiempo,

y que, como los bomberos, sólo se activen durante las emergencias). En otras palabras, el gen queda liberado para participar en la síntesis de las proteínas que correspondan únicamente cuando se relaja el control pertinente. Y esto no es todo: algunas proteínas enzimáticas regulan, a su vez, la síntesis del ARN. (Más aún, es perfectamente posible que existan ciclos catalíticos formados por moléculas de ARN y enzimas: véase Eigen, 1971). En resumidas cuentas, el control genético no es supremo ni jerárquico. Éste es un asunto de interés filosófico, en vista de la afirmación de moda de que la vida está a merced de una panda de genes egoístas e inteligentes.

Además de los controles enzimáticos y genéticos, que regulan de forma directa las miles de reacciones bioquímicas que tienen lugar en el organismo, existen sistemas de biorregulación altamente especializados, tales como los que controlan la acidez, la temperatura, el crecimiento y el movimiento. Se trata de sistemas uni o pluricelulares, en cada uno de los cuales se puede distinguir un *sensor* y un *efector* (o *corrector*). El sensor evalúa tanto el insumo como el producto e «informa» al efector si éstos son adecuados o no. (En realidad, en este nivel, el concepto de información no es necesario: todo lo que el sensor hace es disparar el efector en cuanto detecta un desequilibrio).

En cierto sentido, todas las cosas concretas pueden «sentir» o detectar ciertas otras cosas. Así pues, un átomo puede detectar la luz (vale decir, reaccionar ante la luz), así como la proximidad de otros átomos. Sin embargo, los biorreguladores son *específicos*: algunos, por ejemplo, detectan la gravedad (o, mejor dicho, las desviaciones de la vertical), otros la intensidad luminosa, otros aun la frecuencia de la luz, las diferencias de acidez o las diferencias de temperatura. Más aún, mientras que, por lo general, los detectores físicos y químicos captan intensidades o valores absolutos, todos los biosensores detectan *desequilibrios*, vale decir, diferencias entre los valores reales y los valores normales («finales»). Esta detección se consigue mediante su condición de componentes de los bucles de realimentación. En resumen, los biorreguladores son específicos y corrigen desequilibrios.

Más aún, a diferencia de un montón de detectores físicos, los biorreguladores de los organismos constituyen una red: interaccionan y, en un organismo saludable, lo hacen de manera sinérgica –vale decir, en forma coordinada– en lugar de hacerlo cada uno por su cuenta. (Esta interacción puede involucrar una cantidad tan pequeña de energía y, a la vez,

tener efectos tan importantes que habitualmente se le llama 'informativa'. Véase el Apéndice A, Sección 1.4). Por ejemplo, las diversas glándulas de secreción interna de un vertebrado están interconectadas a través de hormonas que transporta el torrente sanguíneo, y las diferentes partes del sistema nervioso están en contacto («se hablan unas a otras») por medio de conexiones sinápticas, así como de «mensajeros» hormonales. En resumidas cuentas, los sistemas de control de un organismo constituyen redes de señales (o informativas). En realidad, todos los organismos, con independencia de cuán primitivos sean, están provistos de dos redes interconectadas de señales: una red interna, constituida por sus biorreguladores internos, y una red de interfaz constituida por biorreguladores que detectan los cambios del entorno. Estas dos redes están acopladas entre sí y entre ambas controlan todas las funciones del organismo.

Ésta es, por consiguiente, una de las peculiaridades de los organismos: a saber, la de poseer varios sistemas de control agrupados en *redes de señales* altamente integradas. Otra de sus peculiaridades es que esas redes funcionan bien, asombrosamente bien en la mayoría de los casos. 'Bien' no quiere decir ni a máxima potencia ni con máxima economía, sino de la manera –cualquiera sea ésta– que resulte más valiosa para el organismo como totalidad. (Recuérdese la Definición 3.9, de biovalor). Por ejemplo, el ritmo al que se sintetiza una proteína dada no es ni el mínimo (máxima economía de recursos) ni el máximo (derroche), sino uno que está en algún punto entre esos dos extremos: por encima del punto de equilibrio y por debajo del derroche. Esta cercanía a lo óptimo es característica de los biosistemas.

A diferencia de la biología, la física y la química están dominadas por principios externos, tales como el de Hamilton, vale decir, por enunciados legales básicos según los cuales de todos los procesos de toda clase concebibles, sólo se actualizan aquellos que o bien minimizan, o bien maximizan cierta magnitud, por ejemplo, la acción. (Cf. Apéndice B, Sección 1.4). Por supuesto, estos principios «operan» sobre los componentes físicos de un biosistema, pero éstos interaccionan de tal manera que ciertas propiedades que son valiosas para el organismo como totalidad son cuasioptimizadas, en lugar de ser minimizadas o maximizadas. Es decir, esos cuasióptimos no son determinados de forma local e independiente por cada sistema, sino que resultan de la interacción entre los diversos subsistemas del organismo. De hecho, puesto que los diferentes componentes de la red de regulación del organismo como totalidad son

interdependientes, la cuasioptimización de ciertas variables locales obstaculizaría la de otras. Por consiguiente, no es posible lograr lo mejor para cada subsistema. Pero sí se puede lograr lo mejor después de lo mejor y se trata de un «acuerdo» entre los diversos óptimos. Podemos llamar a este acuerdo *cualidad cuasióptima global* (u organísmica). No es completamente óptima porque ningún organismo es perfecto. (Una bioespecie perfecta no estaría sometida a la evolución). Sólo la organización biológica de las especies *exitosas tiende* a lo óptimo.

Se puede decir que un organismo posee una red de biorregulación eficaz si es capaz de resolver todo desequilibrio que pueda acontecerle, vale decir, si puede detectarlo y corregirlo. Si no es así, el organismo se enferma y puede morir. Más precisamente, todo mal funcionamiento de un sistema específico de biocontrol es una enfermedad específica. (La inversa es falsa. Por ejemplo, si el organismo consigue superar una enfermedad infecciosa, lo consigue gracias al adecuado funcionamiento del sistema inmunitario). Y si varios sistemas de biorregulación funcionan en forma incorrecta o no lo hacen de manera sinérgica sobreviene una enfermedad no específica (genérica). Probablemente la muerte natural sea el estado final de un proceso de enfermedad genérica (no específica).

La biorregulación ha dado lugar a la creencia de que los organismos persiguen fines: que actúan en todo de forma tal de garantizar su propia preservación o, por lo menos, la de su especie. La teoría de evolución por selección natural, primero, y más tarde la teoría del control deberían haber corregido esta ilusión. En primer lugar, la autorregulación es una propiedad de todos los sistemas bioquímicos –en virtud de su actividad enzimática– sea que estén vivos, sea que no lo estén. Y si se definiese la integridad del sistema como un equilibrio (un estado estacionario), entonces se constataría que todos los sistemas bioquímicos se comportan *como si* buscaran su propia preservación. En segundo lugar, la biorregulación no es siempre eficiente: cuando el organismo enferma no es óptima y falla del todo cuando aquél muere. En tercer lugar, la biorregulación puede fallar incluso en los organismos saludables, cuando algunos desequilibrios superan ciertos límites durante catástrofes tales como las inundaciones y las sequías. (Después de todo, la gran mayoría de las bioespecies de la Tierra se ha extinguido). En cuarto lugar, a veces, la biorregulación es defectuosa. Por ejemplo, sólo una pequeña parte del ARN sintetizado en el núcleo celular migra al citoplasma circundante para regular la síntesis de proteínas: la mayor parte del ARN

es descompuesta y transformada otra vez en nucléotidos sin haber sido «usada» jamás. Otro ejemplo: muchos genes no se «expresan», o activan, nunca. En quinto lugar, la regulación genética no es tan estricta como para impedir las mutaciones, la mayoría de las cuales son nocivas. En todo caso, no necesitamos invocar finalidades para explicar por qué, normalmente, la biorregulación es beneficiosa para el organismo como totalidad: los organismos que no están provistos de redes de regulación eficaces perecen antes de reproducirse, eso es todo.

2.4. El desarrollo

Se puede representar la historia de cada sistema mediante la trayectoria del punto que lo representa en un espacio de estados adecuado para el sistema. (Cf. Capítulo 1, Sección 2.2). En particular, la *historia de vida* de un organismo puede representarse como una línea trazada en su espacio de estados. La parte de esa historia de vida comprendida entre el inicio (nacimiento) y la adquisición del estado adulto se llama *desarrollo* del organismo. (Véase, Bonner, 1974). El proceso de desarrollo de un organismo posee tres aspectos principales, de cada uno de los cuales se ocupa un grupo de componentes de la función de estado que representa sus estados posibles. Estos aspectos del desarrollo son:

(i) el *crecimiento*, o multiplicación de las células de ciertas clases (a ritmos diferentes en los diferentes subsistemas del organismo);

(ii) la *morfogénesis*, o formación de nuevos subsistemas;

(iii) la *diferenciación*, o especialización de las células.

Estos tres aspectos del desarrollo se producen bajo tres tipos de regulación [o control]: uno enzimático, uno genético y otro ambiental. El entorno [o ambiente] proporciona o mezquina los medios, las enzimas efectúan la transformación de los posibles precursores ambientales y los genes dirigen todo el proceso –a condición de que sus reguladores les permitan hacerlo, como ya vimos en la subsección anterior. (Algunos biólogos moleculares tienden a subestimar el control que ejerce el entorno. Sin embargo, éste puede ser drástico, tal como lo ilustra la esporulación de los mohos, la cual acontece cuando el ambiente es desfavorable). Una forma de caracterizar los rasgos prominentes del proceso de desarrollo es la que ofrece la

DEFINICIÓN 3.11 Si *b* es un biosistema, luego

(i) *b crece* sii (*a*) algunas de las moléculas de ADN de *b* se duplican y (*b*) las tasas de síntesis de ARN y proteínas de *b* son mayores que sus respectivas descomposiciones;

(ii) en *b* tiene lugar la *morfogénesis* sii algunos procesos de *b* consisten en la formación de nuevos sistemas subcelulares (*morfogénesis intracelular*), nuevas células (*morfogénesis celular*) o nuevos órganos (*organogénesis*);

(iii) en *b* tiene lugar la *diferenciación* sii *b* es un organismo pluricelular, tal que (*a*) el número de funciones específicas de *b* aumenta cuando lo hace el número de células y (*b*) diferentes células o sistemas pluricelulares realizan diferentes funciones específicas.

De estos tres aspectos del desarrollo, la morfogénesis siempre ha parecido ser la más misteriosa y la más claramente indicativa de un diseño y una finalidad. Para empezar, la propia palabra 'morfogénesis' sugiere un proceso en el cual algo sin forma (por ejemplo, el huevo) adquiere una forma determinada (configuración o pauta espacial). Si bien ello es así en los niveles físico y químico, como ocurre en los ejemplos de la generación de ondas en un fluido homogéneo o el crecimiento de cristales en las disoluciones, no es el caso en el bionivel: aquí los procesos morfogenéticos son aquellos en los que emergen nuevas formas a partir de las antiguas. (Para ejemplos y modelos de procesos de autoorganización a diferentes niveles, véase Glansdorff y Prigogine, 1971; Gierer y Meinhardt, 1972; Glass, 1973; Tyson, 1976; y Nicolis y Prigogine, 1977). En la embriología, especialmente, todas las etapas del desarrollo son estructuradas en lugar de amorfas. Además, el cambio de forma no es el rasgo principal ni impulsor del desarrollo, sino el resultado de un proceso profundo, tal como la difusión de los productos de una reacción enzimática o la multiplicación celular bajo el control de morfógenos –enzimas, hormonas, genes. (La morfología clásica se limitaba a la descripción del resultado neto de esos procesos: no intentaba –ni podía– explicarlos hipotetizando los correspondientes mecanismos bioquímicos y celulares. Asimismo, la pretenciosa obra de Thom (1972), que ignora olímpicamente los morfógenos, las limitaciones físicas, la selección natural, el azar y la historia, no supera la morfología clásica, salvo por el añadido de una matemática de dudosa utilidad).

Se puede considerar que la morfogénesis es un caso particular del autoensamblaje de moléculas, orgánulos o células, según sea el caso. Co-

mo otros procesos de autoensamblaje, los morfogenéticos están guiados tanto por fuerzas internas como por recursos y condiciones ambientales. La formación de un orgánulo, una célula o un órgano está controlada por los genes y otros morfógenos junto con el *milieu intérieur* y el entorno. Las moléculas de ADN y ARN, las hormonas y otros morfógenos controlan las reacciones químicas y los procesos de difusión, así como el ensamblaje y el desensamblaje de las diferentes unidades, pero nada se hace a menos que el entorno suministre los materiales y la energía para ello.

Un proceso de autoorganización puede comenzar de forma espontánea en un sistema inicialmente homogéneo de reactivos y morfógenos. En consecuencia, una fluctuación aleatoria local de su concentración puede propagarse por todo el medio, culminando en un sistema diferenciado (Turing, 1952). Sin embargo, los procesos de reacción y propagación no son los únicos mecanismos morfogenéticos ni son característicamente biológicos. Existen mecanismos alternativos, tales como (*a*) los procesos de clasificación (agrupamiento de unidades funcionalmente similares, como en el caso de los polirribosomas), (*b*) las interacciones cooperativas entre moléculas o células de diferentes clases, (*c*) el empaquetado, el plegamiento y otros efectos mecánicos de la acreción y la presión externa, (*d*) la síntesis enzimática de morfógenos que tiene lugar hasta que se forma una entidad nueva y que, tras ello, queda inhibida.

Echemos un rápido vistazo a los procesos de la primera clase, es decir, a los procesos de clasificación (Steinberg, 1963; Mostow, 1975). Sea *C* un conjunto de células de las clases, *A* y *B*. Supongamos que todas estas células son móviles y que las células de la misma clase se adhieren entre sí con mayor intensidad de la que lo hacen con las de diferente clase. Además, supongamos que las células del tipo *B* se adhieren entre sí con menor intensidad que las del tipo *A*. En resumen, supongamos que las fuerzas (o energías) de adhesión se relacionan del siguiente modo:

$$W_A > W_B \geq W_{AB},$$

donde W_A mide la adhesión de las células de la clase *A*, W_B la adhesión de las células *B* y W_{AB} la de las células de diferentes clases. Es posible imaginar –y, por cierto, comprobar rigurosamente– que las células se agrupan y se clasifican por sí mismas. En particular, si $W_{AB} = 0$, la clasificación sería completa: resultarían dos tejidos separados. Véase la Figura 3.4.

Aunque los detalles de esos procesos de autoensamblaje distan de ser conocidos, no hay ninguna excusa para considerarlos incognoscibles. La única manera en que los procesos morfogenéticos pueden parecer misteriosos es que se adopte una concepción vitalista o una versión primitiva del mecanicismo, una versión según la cual la materia es un mero agregado de partículas inertes. Pero la biología ha superado ambos extremos: no admite entidades ni fuerzas supramateriales, y ha aprendido que las moléculas, en particular los compuestos del carbono, pueden agruparse de muchos modos diferentes y formar sistemas de gran complejidad y, con frecuencia, también de gran belleza.

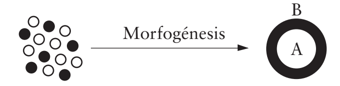


Figura 3.4. La formación de un órgano en forma de cebolla, compuesto por dos esferas concéntricas de células de diferentes clases, *A* y *B*, según Steinberg (1963).

En los organismos pluricelulares, uno de los resultados de la morfogénesis es la diferenciación. Se puede considerar que el grado de diferenciación de un sistema es igual al número total de funciones específicas que llevan a cabo sus diversos subsistemas. Ahora bien, para que un sistema complejo se mantenga unido, sus diferentes subsistemas deben estar altamente coordinados. En otras palabras, mientras que la sistemicidad en general requiere de la existencia de vínculos entre los componentes del sistema, la *sistemicidad orgánica* exige, además, que los vínculos estén altamente coordinados, de forma tal que casi todos los componentes del sistema sean valiosos para el sistema como totalidad. En particular, para que las reacciones *acontezcan* no sólo deben estar presentes los reactivos adecuados en condiciones favorables, sino que esas reacciones tienen que ocurrir a un ritmo adecuado y en una secuencia adecuada. Además, no debe haber ningún componente que bloquee el funcionamiento de los demás, a menos que tal bloqueo resulte valioso para el organismo como totalidad. Todo lo anterior se resume en la consabida perogrullada de que «Cuanto mayor es la diferenciación en un organismo, mayores son su coordinación y su integración». (Huelga decir que la coordinación no es una finalidad del desarrollo, sino que lo que sucede es que los organismos que no logran una coordinación eficaz perecen).

2.5. La reproducción y la herencia

Una de las propiedades de los organismos es que pueden reproducirse. (Los organismos con reproducción sexual no se reproducen si no se aparean, pero la mayoría de sus células se divide. Y las neuronas, normalmente, no se dividen, pero las células ligadas a ellas sí que lo hacen). Además, los organismos se reproducen de tal forma que son «leales a su clase», vale decir, la descendencia pertenece a la misma especie que los progenitores. (La especiación toma numerosas generaciones porque es el resultado de la acumulación de mutaciones y de sucesivas selecciones).

La base de la reproducción es el proceso químico de duplicación del ADN. (Véase el Capítulo 2, Sección 2.1). Esto explica el aspecto invariable de la herencia, especialmente en los organismos que presentan reproducción asexual. Los organismos que tienen reproducción sexual son mucho más variables a causa de la recombinación (o barajadura casi aleatoria) de los genes parentales. En ambos casos, el sistema genético, o genoma –que está compuesto por moléculas de ADN– está «a cargo» de la herencia. Los organismos no son arrastrados por ciertos fines, sino empujados por la memoria genética del pasado, con perdón de la metáfora.

Se sabe que el sistema genético, del cual en una época se pensaba que era inmutable, está sometido a mutaciones. El mecanismo de esas mutaciones es molecular. Pensemos en las moléculas de ADN de la célula. Como sabemos, estas moléculas pueden duplicarse. Ahora bien, durante el proceso de duplicación, pueden ocurrir accidentes («errores») de dos clases: (*a*) las cadenas moleculares hijas pueden diferir de sus progenitoras en el orden o secuencia de los nucleótidos (vale decir, las moléculas de ADN hijas son isómeros de sus progenitoras) o (*b*) puede suceder que se eliminen o bien se inserten uno o más nucleótidos (sustitución). Además, dado que el ADN regula la síntesis de proteínas, esos «errores» probablemente conlleven la síntesis de proteínas de diferente clase de las que contenían las células parentales, es decir, el ADN mutante puede «codificar» (regular la síntesis de) nuevas proteínas. Y éstas hacen posible que la descendencia interaccione de maneras nuevas –no necesariamente más eficientes– con el entorno. El resultado final es un organismo mutante, el cual puede ser viable o no. Véase la Figura 3.5.

Las mutaciones no son frecuentes, pero sin duda tendrán lugar en poblaciones de gran tamaño, o bien a lo largo de muchas generaciones. Y el número de mutaciones posibles y, por ende, de nuevas proteínas po-

sibles y de organismos posibles más o menos diferentes de sus ancestros es abrumador. (¡Compárese esto con los pobres «mundos posibles» imaginados por los lógicos filosóficos!) En efecto, las mutaciones son una fuente inagotable de novedad biótica. Además, puesto que se producen en forma aleatoria y con independencia de su valor o nocividad para los organismos, se ha afirmado que el azar es la única fuente de novedad en la biosfera (Monod, 1970, pág. 127). Se trata de una exageración. Las afinidades químicas que están en la base de las secuencias de nucleótidos no son nada aleatorias y la acción selectiva del entorno tiene componentes tanto causales como aleatorios. (Véase la Sección 3).

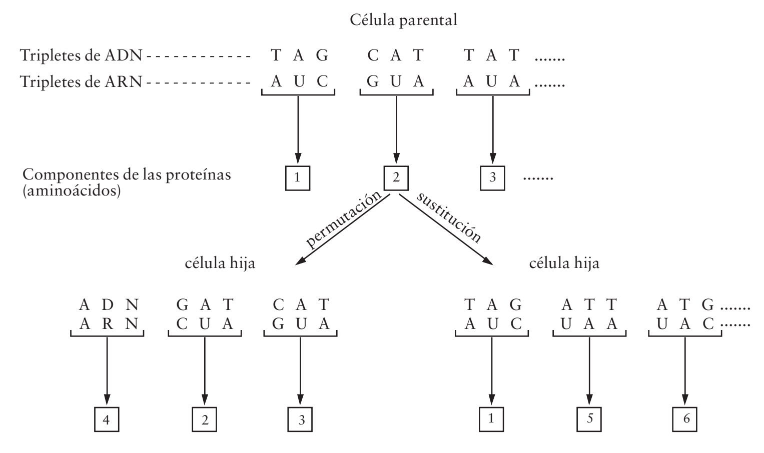


Figura 3.5. Dos clases de mutación: por permutación y por deleción (o inserción) de nucleótidos.

El elevado número de mutaciones posibles explica la singularidad proteica de cada organismo. De forma equivalente, también da cuenta de numerosas diferencias individuales dentro de una misma especie, lo que de un modo engañoso se llama «variabilidad individual». También explica el gran número de bioespecies. Además, los limitados recursos ambientales, con la concomitante competición por esos recursos, explica por qué las biopoblaciones no crecen de manera exponencial (salvo durante períodos limitados). Por último, los cambios de las condiciones ambientales –en especial cambios importantes, tales como las glaciaciones y la deriva continental– explican por qué (*a*) la mayoría de las bioespecies que han existido en la Tierra se han extinguido y (*b*) el número de especies puede aumentar o disminuir de forma relativamente

repentina durante determinados períodos breves. (Uno de esos períodos revolucionarios tuvo lugar a comienzos del Cámbrico, época en la que surgieron numerosas especies de organismos pluricelulares).

En vista de la afirmación de moda de que todo lo que hace un organismo, sea lo que fuere, está programado en su genoma, puede ser útil hacer hincapié en que lo que se hereda es un trozo de material genético que transporta ciertas potencialidades. Éstas pueden actualizarse o no durante la vida del organismo, según las posibilidades que le ofrezca el entorno. (Para los conceptos de potencialidad y actualidad, véase el Capítulo 4 del Volumen 3 de este *Tratado*). También podemos ser más precisos y adoptar la

DEFINICIÓN 3.12 Si b es un organismo, luego

(i) el *genoma* de b = la potencialidad de b al nacer;

(ii) el *fenoma* de b = el conjunto de propiedades molares (globales) de b en su estado adulto.

Mientras que los genetistas centran su atención en el genoma, otros investigadores lo hacen en el fenoma. Ambas perspectivas son cortas de miras, ya que sólo una dotación genética adecuada permite al organismo hacer frente al entorno y sólo un entorno adecuado posibilita que los rasgos genéticos se «expresen» (vale decir, que se activen). Por consiguiente, el organismo hereda su genoma, pero desarrolla su propio fenoma en un entorno dado; el fenoma depende, en consecuencia, tanto del genoma como del ambiente. Dada la variabilidad de ambos, no debería asombrarnos el hecho de que ocurra la evolución. Pero nos ocuparemos de ella en la Sección 3, después de haber estudiado el trasfondo filosófico de las doctrinas contemporáneas sobre el desarrollo y la herencia.

2.6. El desarrollo, la herencia y la tradición metafísica

Los estudios contemporáneos sobre el desarrollo y la herencia han sido influenciados, mayormente de forma inadvertida, por antiguas ideas metafísicas acerca de las relaciones entre la sustancia y la propiedad, por un lado, y entre la potencia y la actualidad por el otro. Debería permitirse que, a su vez, los resultados de esas investigaciones influenciaran nuestras ideas generales sobre los pares sustancia-propiedad y potencia-actualidad.

En primer lugar, pensemos en la relación órgano-función como un caso particular de la relación sustancia-propiedad. Toda biofunción es la función de un orgánulo o de un órgano, pero la inversa es falsa: vale decir, puede haber órganos que no desempeñen ninguna biofunción (los órganos vestigiales o «fósiles») y otros que realicen funciones específicas únicamente en ciertas etapas del desarrollo. En este último caso, a veces el órgano precede al órgano en funcionamiento o, como reza aquella engañosa expresión: «el órgano precede a la función». Por ejemplo, el ojo, el sistema reproductivo y grandes partes del cerebro de un gato se forman antes de llegar a funcionar plenamente.

La precedencia temporal de un órgano no funcional respecto del órgano plenamente funcional parecería refutar la doctrina platónica de que la forma (esencia, o idea) precede a la existencia. No es así, ya que el platónico podría replicar que la forma (función) se inserta en el órgano cuando ello es necesario. Lo que sí refuta la doctrina platónica de las formas es la bien confirmada generalización de que no hay forma (función) sin órgano y que, generalizando, no hay propiedades sin sustancia. (Cf. Volumen 3, Capítulo 2, Sección 5.2). La controversia entre los sustancialistas («el órgano determina la función») y los funcionalistas («la función determina al órgano») es un caso particular de la controversia de la edad de oro de la metafísica acerca de la sustancia y la propiedad. Esta controversia se disuelve al percatarnos de que ninguno determina al otro. Lo que sucede en el caso de los órganos que no realizan su función específica durante toda la vida de un organismo, es que sus estados no funcionales preceden en el tiempo a los estados funcionales.

Otro punto de contacto entre la biología del desarrollo y la teoría de la herencia con la metafísica es la cuestión de la preformación frente a la emergencia. Ha habido dos clases de soluciones al problema de explicar el desarrollo de un organismo desde el huevo hasta la adultez y su descomposición final. Una es suponer que todas las propiedades y pautas que se presentan durante el desarrollo no son otra cosa que el desplegarse (*desarrollarse*) de lo que ya estaba contenido en potencia (*preformado*) en el huevo. Expresado en términos actuales, el supuesto de que el genoma contiene un conjunto completo de «instrucciones» que guían al organismo a través de las sucesivas etapas de su desarrollo. Ésta es la hipótesis *preformacionista* que sostenían Aristóteles y Leibniz, y que fue resucitada por algunos científicos contemporáneos que creen que la biología es totalmente reducible a la biología molecular. El preforma-

cionismo niega la novedad real, especialmente la emergencia de aquellas propiedades nuevas que acompañan la autoorganización (Capítulo 1, Sección 3.2), y minimiza, y hasta ignora, el papel del ambiente.

Los partidarios de la *epigénesis*, en cambio, sostienen que el desarrollo es un proceso epigenético, o creativo, en cada una de cuyas etapas aparecen novedades. Los epigenetistas afirman que el organismo se inicia en un bajo nivel de organización y que con el desarrollo adquiere nuevos componentes y propiedades, a la vez que pierde otros. El epigenetismo es, desde luego, la hipótesis que subyace a toda la embriología clásica, así como a los estudios contemporáneos sobre el origen de la vida.

La revolución de la biología molecular casi ha eclipsado al epigenetismo. Lo que está en boga en la actualidad es el preformacionismo genético. Pese a ello, la moda no coincide necesariamente con la verdad. La afirmación de que el desarrollo no es más que el despliegue, o la implantación, de un plano guardado en el interior del genoma no es más reveladora o correcta que la afirmación de que lo que guía el desarrollo es un *élan vital* inmaterial (Bergson, 1907) o de que, en última instancia, se trata de la corporeización de formas geométricas platónicas que existen por sí mismas (Thom, 1972). Sin duda, el desarrollo no puede ser ni puramente preformativo ni puramente epigenético, aunque sólo fuese porque el entorno proporciona las materias primas necesarias para el proceso y elimina los organismos inadaptados, además de ofrecer oportunidades a los que están preadaptados.

Al parecer, cada una de estas concepciones ha acelerado u obstaculizado el desarrollo de la biología en diferentes momentos. El preformacionismo puede haber estimulado la fase puramente descriptiva de la embriología, así como los comienzos de la biología molecular, en tanto que es posible que el epigenetismo haya estimulado la embriología experimental (especialmente la investigación de los mecanismos de la morfogénesis) y la ecología. Pero ninguno de estos puntos de vista explica nada, porque ambos son meras hipótesis programáticas o un marco de discusión sobre el desarrollo y la herencia. En efecto, lejos de tratarse de teorías plenamente desarrolladas, el preformacionismo y el epigenetismo son hipótesis ontológicas que condensan cuerpos de ideas íntegros, en los que se mezclan de manera inextricable datos y conjeturas firmes con fósiles metafísicos.

Parece bastante posible que el próximo paso revolucionario en las áreas del desarrollo y la herencia sea una suerte de fusión de los dos

marcos conceptuales que coordine dos líneas de investigación: (*a*) la búsqueda de los mecanismos específicos de desarrollo (por ejemplo, las restricciones mecánicas a las que está sometida cada célula, la síntesis y la acción de los morfogenes y las interacciones con el medio nutritivo) y (*b*) la «programación» genética de las posibilidades de desarrollo, potencialidades que están «codificadas» en el genoma, en el sentido de que este último contiene, no las «instrucciones», sino algunos de los reactivos y plantillas claves para que ciertas reacciones bioquímicas acontezcan. Pero no intentemos escribir la historia del futuro.

3. La evolución

3.1. La adaptación

Un rasgo prominente de nuestra biosfera es su gran diversidad. Hay al menos tres millones de bioespecies (Dobzhansky, 1970) y no existen dos individuos estrictamente idénticos en ninguna de ellas. (Hasta los llamados gemelos idénticos son un poco diferentes entre sí). Esta variedad es producto de cuatro mil millones de años de evolución. Y el proceso evolutivo es, a su vez, el efecto neto de una combinación de cambios génicos (mutaciones y recombinaciones) y selección ambiental. El proceso parece continuar: no hay ningún motivo para pensar que se haya detenido en el instante en que nos percatamos de su existencia. De hecho, durante el período que comprende nuestras vidas se ha verificado la extinción de muchas especies y es probable que ahora mismo se estén formando otras nuevas. En resumen, la bioevolución es revolucionaria, creativa (Bergson, 1907) o emergente (Lloyd Morgan, 1933).

En términos antropomórficos, la evolución es un proceso de ensayo y error, o una historia de éxitos y fracasos. El éxito se llama *adaptación* y el fracaso *inadaptación* o [falta de adaptación]. Una biopoblación de individuos bien adaptados prospera o se expande, mientras que una de individuos inadaptados se reduce. Esto parece evidente, pero deja de serlo en el instante en que nos detenemos a examinar el propio término ‘adaptación’ y nos percatamos de cuán engañoso es (Williams, 1966). En realidad, la palabra ‘adaptación’ es ambigua, porque designa tres conceptos diferentes:

A_1 = *adecuación* de un subsistema (orgánulo, órgano, etc.) a una función, o elevado biovalor del subsistema para el organismo como totalidad;

A_2 = *ajuste* del organismo a su entorno;

A_3 = *fertilidad* de una biopoblación.

Que se trata de conceptos diferentes es algo que se reconoce al exhibir sus estructuras. A_1 es una relación entre subsistemas y organismos, A_2 es una relación entre organismos y entornos, y A_3 es una propiedad intrínseca de los organismos. Un examen metodológico confirma la diferencia. De hecho, la manera de saber si algo posee la propiedad A_1 es realizar ciertas observaciones y ciertos experimentos bioquímicos o fisiológicos en un ambiente constante. Mediante la variación de los factores ambientales podemos averiguar si un organismo posee la propiedad A_2, y el criterio para reconocer A_3 es la numerosidad de la descendencia.

En resumidas cuentas, tenemos que resignarnos al hecho de que 'adaptación' es un término ambiguo. Esto es algo que parece obvio y que pasan por alto, sin embargo, quienes sostienen que únicamente la genética de poblaciones utiliza «el concepto correcto», vale decir, A_3. Lo ignoran igualmente quienes afirman que el principio de Darwin y Spencer de la *supervivencia del más apto* es tautológico. En efecto, la supervivencia o fertilidad (A_3) no es lo mismo que el ajuste o adecuación biológica (A_2), sino un indicador de ésta. Las relaciones lógicas entre los tres conceptos son las que siguen: $A_3 \Rightarrow A_2 \Rightarrow A_1$, vale decir, el biovalor de un subsistema es necesario para el ajuste, el cual a su vez es necesario para la fertilidad.

Huelga decir que las adaptaciones de toda clase son dependientes del tiempo. En otras palabras, A_1, A_2 y A_3 varían con el tiempo a causa de cambios internos, ambientales o de ambos tipos de cambio. El caso de cambios ambientales repentinos resulta de especial interés, porque éstos seguramente favorecerán a ciertas biopoblaciones, a la vez que perjudicarán a otras. En el primer caso, se habla de *preadaptación*, en el segundo de *preinadaptación*. De acuerdo con la distinción de los tres conceptos de adaptación, también distinguimos tres tipos de preadaptación:

PA_1 cambio de función (o funciones) a otra(s) de mayor biovalor;

PA_2 mayor ajuste al entorno;

PA_3 mayor fertilidad.

Como en el caso de la adaptación, el primer tipo de preadaptación es necesario para el segundo, el cual es, a su vez, necesario para el tercero; o sea, $PA_3 \Rightarrow PA_2 \Rightarrow PA_1$.

Ninguna de las tres clases de adaptación o preadaptación requiere tener en cuenta elementos teleológicos. Los organismos adaptados o preadaptados pueden sobrevivir y reproducirse, los inadaptados no, y eso es todo. Recurrir a *planes* adaptativos en cada etapa evolutiva (Holland, 1975) es caer en el antropomorfismo. No existe ni la más mínima prueba de tales planes maestros, salvo en el caso del hombre, y no hay ninguna teoría biológica seria que los incluya. En lugar de imaginar planes adaptativos, deberíamos plantear hipótesis acerca de los mecanismos adaptativos y ponerlas a prueba.

3.2. El mecanismo adaptativo

La mutación y la recombinación aleatorias dan lugar a una gran variedad de organismos desigualmente adaptados. De entre ellos, el entorno selecciona los más adaptados y, así, orienta el cambio evolutivo. Por consiguiente, el ambiente es tan creativo como el material genético. Pero mientras que éste varía de forma aleatoria, el entorno tiene un efecto direccional. (Direccional, sí; orientado a fines, no; vale decir, cambia en una dirección determinada, pero no hacia una finalidad; mucho menos, en virtud de una finalidad). De esto se trata, en resumen, la moderna teoría de la evolución.

Un experimento clásico que confirma esta teoría es el que sigue (Waddington, 1959). Se exponen larvas de mosca de la fruta (*Drosophila*) a diversos cambios ambientales, tales como excesos de sal, de calor o de vapor de éter. Si se les proporciona alimentos salados, muchas moscas mueren. Las supervivientes exhiben un agrandamiento de ciertas papilas, las cuales, según se ha conjeturado, tienen un papel en la regulación de la concentración de sales en el cuerpo. (La hipótesis es que se trata de una preadaptación, es decir, que sobreviven aquellos individuos que da la causalidad que han nacido con controles de sales más eficientes, o sea, que están preadaptados a las nuevas condiciones). La vigésima generación es decididamente más resistente a los alimentos salados que el grupo no sometido a selección (o grupo control): alrededor del doble de las moscas seleccionadas sobreviven cuando se les proveen alimentos con un 5 por

ciento más de sal. El nuevo carácter, vale decir, la capacidad de hacer frente a concentraciones de sales anormalmente elevadas, no aparece de un plumazo, sino de resultas de una acumulación gradual producida por los cambios genéticos en conjunción con las presiones ambientales.

No existe ningún plan maestro que guíe la adaptación gradual de los organismos a su entorno; los organismos están adaptados a su ambiente hasta que éste cambia de manera desfavorable, entra en escena la inadaptación y, finalmente, la población es diezmada o incluso borrada de la faz de la Tierra. En efecto, es posible explicar la adaptación como el producto de un proceso aleatorio motorizado por la variación génica (la mutación y la recombinación) y orientado por el entorno. Para aclarar este punto pensemos en una única propiedad P, tal como el tamaño del sistema de control de sales de *Drosophila* en el experimento de Waddington. (Sin duda, esta limitación a una sola propiedad es artificial, puesto que todas las propiedades están relacionadas legalmente con alguna otra propiedad del mismo sistema. Sin embargo, el prestarle atención a una única propiedad no implica negar la existencia de otras propiedades). Haremos las siguientes suposiciones acerca de P:

(i) P posee una distribución simétrica (con forma de campana) en cada población del linaje dado;

(ii) las sucesivas generaciones no se superponen, de forma tal que, en lo que respecta a P, la evolución de la población puede representarse como una secuencia numerable de distribuciones simétricas;

(iii) existe un valor óptimo P_f de esa propiedad dada, vale decir, los individuos que están más cerca de tener ese valor de P tienen las mayores oportunidades de supervivencia. En beneficio de la precisión, supongamos que P_f se encuentra en algún lugar hacia la derecha del valor P_i del centro de la distribución inicial: véase la Figura 3.6.

La variación y la selección garantizan un desplazamiento gradual de la distribución de P hacia la derecha, a condición de que no se haya alcanzado el valor óptimo P_f. En efecto, sólo aquellos organismos con un valor de P cercano al óptimo P_f estarán adaptados y tenderán a transmitir esa característica a su descendencia; no porque quieran garantizar la preservación de su especie, sino a causa de los ciegos procesos moleculares que subyacen a la reproducción. A medida que la adaptación mejora, la supervivencia aumenta y la dispersión –o sea, la variabilidad individual– disminuye. Donde los vitalistas ven un plan maestro, o «proyecto teleonómico», los evolucionistas sólo ven un proceso aleatorio

orientado por la selección natural. (Cf. Levins, 1968, Capítulo 2; Dobzhansky, 1974).

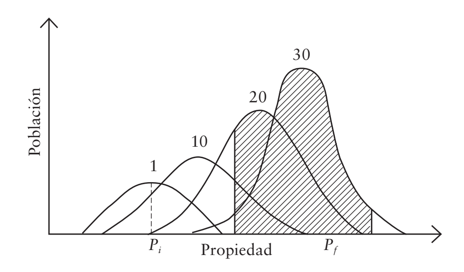


Figura 3.6. Distribución de la propiedad *P* en el curso de 30 generaciones de organismos de un linaje dado en un entorno constante. Las áreas sombreadas representan fracciones de supervivientes. Al principio, sólo una pequeña fracción del total de individuos están adaptados. Al final, la supervivencia se ha incrementado inmensamente, pero la variabilidad ha disminuido. El caso es imaginario y está exagerado.

3.3. La evolución y la coevolución: ideas básicas

Nos hemos estado refiriendo a la evolución sin haber definido el concepto correspondiente. No necesitamos ir muy lejos: el concepto de bioevolución es sólo una particularización del concepto general de historia de un sistema (Capítulo 1, Sección 2.2) para el caso de las biopoblaciones (Definición 3.4). Es decir,

DEFINICIÓN 3.13 La *evolución* de una biopoblación es la historia de ésta. Vale decir, si x es una biopoblación, luego

La evolución de $x = h(x)$.

Así pues, las que evolucionan son las biopoblaciones consideradas como sistemas concretos extendidos en el espacio y en el tiempo, no los individuos ni la especie. (Los individuos se desarrollan y las especies pueden sucederse unas a otras). Si nos centramos en los cambios cualitativos y dejamos a un lado las etapas intermedias, podemos interpretar la línea evolutiva como una sucesión de especies o linajes (Definición 1.17).

Antes de que Darwin propusiera su teoría de la evolución por selección natural, la bioevolución se negaba, o bien se conjeturaba que había ocurrido de modo diferente, por ejemplo, mediante la adaptación y la herencia de caracteres adquiridos (Lamarck). Desde luego, adoptaremos el núcleo de la teoría darwiniana:

POSTULADO 3.4 Todas las poblaciones evolucionan, y la evolución de cada una de ellas consiste en un proceso por el cual ciertos cambios (génicos) espontáneos producen individuos desigualmente adaptados, de entre los cuales el entorno selecciona aquellos que están mejor adaptados.

Decimos que la selección es *natural* si es espontánea y *artificial* si está controlada por el hombre.

Puesto que las biopoblaciones no están aisladas unas de otras sino que interaccionan con otras biopoblaciones formando ecosistemas, la evolución de una de ellas debe afectar la de las demás. Este proceso tiene un nombre:

DEFINICIÓN 3.14 Dos o más poblaciones *coevolucionan* sii la evolución de cada una de ellas afecta la de la otra, vale decir, si x e y son biopoblaciones, luego x e y coevolucionan sii $h(x \mid y) \neq h(x)$ y $h(y \mid x) \neq h(y)$.

Acabamos de decir que todo cambio que tenga lugar en una biopoblación afectará las biopoblaciones con las que aquélla interacciona, en particular, con las que coopera o compite. De este modo obtenemos –aunque de manera informal– un resultado que es lo suficientemente importante como para ser dignificado con el nombre de

TEOREMA 3.1 Toda biopoblación coevoluciona con todas las demás biopoblaciones de su ecosistema.

Éste es el motivo de que se haya sostenido que la unidad de evolución (y, por ende, el referente de la teoría evolutiva) no es tanto la población monoespecífica como el ecosistema en su totalidad (Dunbar, 1960). ¿Y por qué no toda la biosfera? Estas herejías son de sentido común en nuestra ontología sistémica, ya que todo cambio que tiene lugar en un sistema afecta indefectiblemente a otro componente al cual está acoplado. (El único modo de evadir el Teorema 3.1 es negar que los ecosistemas existan y desafiar las pruebas al respecto). La moraleja para el desarrollo de modelos matemáticos de la evolución es obvia: comiéncese por modelizar la evolución de una biopoblación; continúese con la modelización

del (sub)sistema compuesto por una biopoblación dada y su(s) socio(s) o rival(es) más próximos –por ejemplo, los peces de las rocas y las algas de las que pueden alimentarse– y finalmente inténtese modelizar todo el ecosistema de interés. ¡Es más fácil decirlo que hacerlo!

Según la Definición 3.13, todo proceso evolutivo puede representarse como una trayectoria del punto que representa del estado de una biopoblación (o un ecosistema) en su espacio de estados. Sin embargo, la manera de escoger los componentes de la función de estado que abarca ese espacio de estados no resulta obvia en absoluto. (Cf. Lewontin, 1974). Una posibilidad es seleccionar las frecuencias (en realidad, probabilidades) génicas como coordenadas o componentes de la función de estado. Ésta es la estrategia adoptada por la genética de poblaciones. No ha resultado demasiado fructífera a causa de que la selección actúa sobre los fenomas, no sobre los genomas. (Lo que el entorno tolera o elimina son los organismos como totalidades, no sólo sus genomas). El extremo opuesto es, desde luego, escoger como componentes de la función de estado sólo variables molares o fenotípicas. Pero esto dejaría la fuente principal de variabilidad individual en la oscuridad. Además de lo cual, ninguna de estas estrategias admite variables ambientales. Por ello, debemos recurrir a un enfoque diferente: realizar censos de las diferentes subpoblaciones de una biopoblación dada en diferentes momentos e interpretar sus resultados como el efecto neto de la variabilidad genética y la selección por el entorno. Es lo que haremos en la subsección siguiente, con las debidas disculpas a los biólogos por incursionar en su territorio.

3.4. Un esquema del proceso evolutivo

Nos proponemos bosquejar un modelo sencillo del proceso evolutivo (Bunge, 1978a). Consideremos una biopoblación de organismos, tales como bacterias de cierta clase, que se reproducen por fisión binaria. Supongamos que cada individuo vive una unidad de tiempo, al final de la cual se divide simultáneamente junto con todos los demás miembros de la población. Supongamos, además, que en cada generación surgen mutantes y que es posible agruparlos en diferentes variedades. Llamemos V_i a la i-ésima variedad, donde $1 \leq i \leq n$, y contemos la población de cada variedad en cada generación. Además, llamemos N_t^i a la población de la variedad V_i en el instante (generación) t. Si la fracción de cada ge-

neración que muere sin dejar descendencia es $d_i < 1$, luego la población de la variedad V_i en el instante $t + 1$ es

$$N^i_{t+1} = 2(1 - d_i)\, m_{ii}\, N^i_t, \tag{3.1}$$

donde m_{ii} es la probabilidad de que la fisión binaria no esté acompañada de una mutación y el factor 2 da cuenta de la división de cada organismo en dos nuevos individuos.

La fórmula anterior da por supuesto que toda la descendencia de la generación t pertenece a la misma variedad. En realidad, el número de individuos de la variedad V_i en el instante $t + 1$ será diferente del anterior en dos términos: la fracción que deja esa variedad determinada y la fracción que se incorpora a ella, por mutación en ambos casos. Llamemos m_{ij} a la probabilidad, por unidad de tiempo, de una mutación desde la variedad V_i a la variedad V_j. Estas probabilidades se someten a la condición de normalización

$$\sum_j m_{ij} = 1 \quad \text{para todo } 1 \leq i \leq n. \tag{3.2}$$

El promedio de desertores de la variedad V_i entre los instantes t y $t + 1$ será

$$D^i = 2 \sum_{j \neq i} m_{ij}\, (1 - d_i)\, N^i_t. \tag{3.3}$$

Y los conversos a la variedad V_i en el mismo intervalo numérico serán

$$C^i = 2 \sum_{j \neq i} m_{ji}\, (1 - d_i)\, N^i_t, \tag{3.4}$$

ya que provendrán de todas las variedades, con excepción de V_i. El factor 2 de D^i y C^i muestra que estamos haciendo la hipótesis adicional de que los mutantes se presentan en pares, vale decir, que si un organismo es mutante, su hermano también lo es.

Al reunir (3.1), (3.3) y (3.4) obtenemos la población promedio neta de la variedad V_i en el instante $t - 1$:

$$N^i_{t+1} = 2m_{ii}\,(1-d_i)\,N^i_t - D^i + C^i =$$

$$= 2\Big[\, m_{ii}\,(1-d_i) \; - \sum_{j\neq i} m_{ij}\,(1-d_i)\Big]\, N^i_t$$

$$+\; 2\sum_{j\neq i} m_{ji}\,(1-d_j)]\; N^j_t. \qquad (3.5)$$

Dada la condición de normalización (3.2) de las probabilidades de mutación, la probabilidad total de mutación desde V_i es

$$\sum_{j\neq i} m_{ij} = \sum_{j} m_{ij} - m_{ii} = 1 - m_{ii}. \qquad (3.6)$$

Si introducimos este valor en (3.5), obtenemos finalmente

$$N^i_{t+1} = 2(2m_{ii}-1)\,(1-d_i)]\; N^i_t + 2\sum_{j\neq i} m_{ji}\,(1-d_j)]\; N^j_t. \qquad (3.7)$$

Este sistema de *n* ecuaciones de recurrencia lineales resume nuestro modelo de la evolución. La solución para estas ecuaciones puede obtenerse como sigue. Establecemos

$$a = \| a_{ij} \| = \| 2(2m_{ii}-1)\,(1-d_i)\delta_{ij} \| \qquad N_t = \left\| \begin{matrix} N^1_t \\ N^2_t \\ . \\ . \\ . \\ N^n_t \end{matrix} \right\|, \qquad (3.8)$$
$$b = \| b_{ij} \| = \| 2m_{ij}\,(1-d_i)\,(1-\delta_{ij}) \|,$$

donde $\delta_{ij} = 1$ sii $i = j$ y, de lo contrario, $\delta_{ij} = 0$. (La transpuesta de N_t es el valor de la función de estado del sistema en *t*). El sistema (3.8) se puede condensar en la ecuación de recurrencia matricial

$$N_{t+1} = (a + b^T)N_t, \text{ en la cual } \| b_{ij} \|^T = \| b_{ji} \|. \qquad (3.9)$$

Si iteramos (3.9), encontramos la ecuación general de evolución

$$N_{t+k} = (a + b^T)^k N_t, \text{ en la cual } k \in \mathbb{N}. \quad (3.10)$$

La solución a esta ecuación es

$$N_t = (a + b^T)^t N_0, \quad (3.11)$$

donde N_0 es la matriz columna de las poblaciones iniciales de las n variedades que se consideran.

Supongamos que todas las entradas de la matriz evolutiva $a + b^T$ son positivas y que al principio hay una única variedad. Luego, todas las demás variedades pueden surgir simultáneamente en la generación siguiente y el proceso de mutación y selección tiene lugar de forma inexorable. Una vez que ha surgido, cada una de las n variedades prospera y la prosperidad de cada una de ellas es conducente a la de todas las demás. (El único cambio cualitativo de este proceso puede inducirse mediante un cambio repentino del entorno que causara que algunas tasas de mortalidad saltaran a la unidad). Pero, en general, el proceso no será explosivo: mientras que algunas entradas de la matriz evolutiva pueden ser positivas, otras pueden ser nulas o negativas. Desde luego, una matriz completamente negativa corresponde a la extinción.

Mientras las tasas de mortalidad d_i y las probabilidades de mutación m_{ij} no estén especificadas, el modelo será un esqueleto fenomenológico. Pasemos a darle cuerpo.

3.5. El mecanismo subyacente

Procedamos a especificar la arquitectura de nuestros organismos en proceso de evolución, así como su mutabilidad (las m_{ij}) y su viabilidad (las d_i). Suponemos que las n variedades de nuestra biopoblación difieren entre sí por la composición u organización de un número fijo de módulos o unidades básicas que pueden repetirse. En beneficio de la simplicidad, supondremos que hay sólo dos clases de módulos, a los cuales podemos llamar 0 y 1. Por consiguiente, si cada entidad está compuesta por cuatro de esos módulos organizados de manera diferente, obtenemos un total de $n = 2^4 = 16$ variedades, a saber, 0000, 1000, 0100, 0010, 0001, 1100, 0110, 0011, 1010, 0101, 1001, 1110, 0111, 1011, 1101 y 1111. La fórmula general para una variedad cuyos miembros están compuestos de

m módulos es *abc...m,* en la cual cada letra es un dígito binario. Hasta aquí llegamos con la arquitectura.

Todo cambio producido en al menos uno de los *m* dígitos binarios que aparecen en la fórmula para una variedad es una mutación. Por consiguiente, un mutante diferirá de su organismo parental o bien por el número total de 0 (ó 1) o por el orden de los 0 y 1. En consecuencia, en el ejemplo anterior, las transiciones 0000 → 1000, 0100 → 0110 y 0111 → 1111 son mutaciones y, a la vez, cambios de variedad. Desde luego, no todas las mutaciones tienen igual probabilidad. Determinaremos ciertas relaciones entre las probabilidades de mutación, con las siguientes reflexiones acerca de la viabilidad.

Aquí entra en escena el entorno. Agrupamos todos los factores ambientales en una única función de variable real *e*, con valores en el intervalo real [–1, 1]. Además, suponemos que la probabilidad de que un organismo perteneciente a la variedad V_i sobreviva hasta completar su fisión es simétrica alrededor del origen. De manera más precisa, suponemos que las tasas de mortalidad d_i de (3.1), lejos de ser constantes, dependen de la variable ambiental *e* del siguiente modo:

$$1 - d_i = \begin{cases} v_i(1 - e^2) & \text{para } -1 \leq e \leq 1 \\ \text{de lo contrario, } 1 & \end{cases} \tag{3.12}$$

donde $0 \leq v_i \leq 1$ para cada variedad V_i.

Puesto que v_i es característica de cada variedad y depende del entorno, la llamaremos *ajuste* de los organismos de la variedad V_i. El factor $(1 - e^2)$ representa la presión selectiva que ejerce el entorno. Un incremento o una disminución importante de *e* tendrá un impacto considerable sobre la fracción $1 - d_i$ de una población dada que sobrevive hasta completar la siguiente división. En particular, si tiene lugar una catástrofe ($e = \pm 1$), no quedarán supervivientes, vale decir, $d_i = 1$ para todo *i*. En cambio, si las condiciones ambientales son óptimas ($e = 0$), luego, la fracción v_i de individuos de la variedad V_i sobrevive lo suficiente como para dividirse. La variable *e* es, en resumen, el componente causal, o no estocástico, de la evolución.

A continuación introduciremos un supuesto que, como mínimo, nos permitirá ordenar los valores de viabilidad. Nuestra hipótesis es que cuanto más variada sea la composición de un organismo, mayores serán

sus oportunidades de supervivencia. Por consiguiente, en el caso m = 2, en el cual sólo tenemos las variedades 00, 01, 10 y 11, establecemos

$$\begin{aligned} &v_1 = v_4 \equiv v && \text{para 00 y 11} \\ &v_2 = v_3 = \alpha v && \text{con } \alpha > 1 \text{ para 01 y 10.} \end{aligned} \tag{3.13}$$

Por último, relacionaremos la viabilidad con la mutabilidad, y lo haremos del siguiente modo: postulamos que una mutación es más probable cuanto menos viable sea su resultado. (Este supuesto es congruente con la conocida generalización de que la mayoría de las mutaciones son letales). Más precisamente, suponemos que

$$m_{ij} \geq m_{ik} \quad \text{si y sólo si } v_j \leq v_k. \tag{3.14}$$

Ahora podemos construir la matriz de probabilidades de mutación en el caso simple en el cual m = 2, de donde n = 4. En este caso, las viabilidades son las indicadas en (3.14). Por consiguiente, las oportunidades de reproducción son

$$\begin{aligned} &1 - d_1 = 1 - d_4 = v(1 - e^2) \\ &1 - d_2 = 1 - d_3 = \alpha v(1 - e^2). \end{aligned} \tag{3.15}$$

La hipótesis (3.14) de que la mayoría de las mutaciones son nocivas, junto con el supuesto (3.13) acerca de los valores de ajuste, implican que

$$m_{41} = m_{14}, \quad m_{32} = m_{23} = m \tag{3.16}$$

(donde no debe confundirse esta m con el número de clases de módulos por organismo, que ya hemos establecido en 2), y

$$\begin{aligned} &m_{21} = ß_1 m_{12}, \quad m_{31} = ß_1 m_{13} \\ &m_{24} = ß_2 m_{42}, \quad m_{34} = ß_2 m_{43}, \end{aligned} \tag{3.17}$$

con $ß_1, ß_2 > 1$. Simplificaremos el caso conviniendo que $ß_1 = ß_2 = ß$, con lo cual se obtiene

$$\begin{aligned} &m_{21} = ß m_{12}, \quad m_{31} = ß m_{13} \\ &m_{24} = ß m_{42}, \quad m_{34} = ß m_{43}. \end{aligned} \tag{3.18}$$

Dado que las permutaciones de módulos son mucho menos radicales que los cambios en la composición, añadiremos los siguientes supuestos simplificadores:

$$m_{12} = m_{13}, \quad m_{24} = m_{34}. \tag{3.19}$$

De forma semejante, supondremos que la variedad 01 es igual de estable que la variedad 10, y que 00 y 11 también son igualmente estables entre sí:

$$m_{22} = m_{33}, \quad m_{11} = m_{44}. \tag{3.20}$$

Nuestro último supuesto es que las mutaciones entre las variedades extremas 00 y 11 tienen lugar a través de las especies intermedias 01 y 10, vale decir,

$$\begin{aligned} m_{14} &= m_{12} \cdot m_{24} + m_{13} \cdot m_{34} \\ m_{41} &= m_{42} \cdot m_{21} + m_{43} \cdot m_{31} \end{aligned} \tag{3.21}$$

La primera consecuencia de estos supuestos es que

$$\begin{aligned} &m_{21} = m_{31}, \quad m_{42} = m_{43} \\ &m_{14} = 2m_{12} \cdot m_{24} = m_{41} = 2m_{21} \cdot m_{42}. \end{aligned} \tag{3.22}$$

Finalmente, utilizaremos la condición de normalización (3.6), la cual, conjuntamente con las igualdades anteriores, da como resultado la matriz de mutabilidad en términos de m_{11}, m_{22} y m:

$$\|m_{ij}\| = \left\| \begin{matrix} m_{11} & \frac{(1 - m_{11})}{(3 - m_{22} - m)} & \frac{(1 - m_{11})}{(3 - m_{22} - m)} & \frac{(1 - m_{11}) \cdot (1 - m_{22} - m)}{3 - m_{22} - m} \\ ½(1 - m_{22} - m) & m_{22} & m & ½(1 - m_{22} - m) \\ ½(1 - m_{22} - m) & m & m_{22} & ½(1 - m_{22} - m) \\ \frac{(1 - m_{11}) \cdot (1 - m_{22} - m)}{3 - m_{22} - m} & \frac{(1 - m_{11})}{(3 - m_{22} - m)} & \frac{(1 - m_{11})}{3 - m_{22} - m} & m_{11} \end{matrix} \right\| \tag{3.23}$$

A continuación, rastrearemos la evolución de nuestra biopoblación compuesta por cuatro variedades. Para calcular sus respectivos núme-

ros en generaciones sucesivas, debemos saber cuáles eran sus números iniciales. Supongamos que, inicialmente, sólo había una única variedad, por ejemplo, V_1 ó 00. Llamemos $N_0^1 = N$ a su población inicial. Luego, en virtud de (3.7), una generación más tarde los números promedio son:

$$N_1^1 = 2(2m_{11} - 1)\,(1 - d_1)N$$

$$N_1^2 = \frac{2(1 - m_{11})}{3 - m_{22} - m}(1 - d_1)N \qquad (3.24)$$

$$N_1^3 = N_1^2$$
$$N_1^4 = (1 - m_{22} - m)N_1^2.$$

Si $m_{11} \leq ½$ o $d_1 = 1$, la primera variedad se extingue de inmediato. Y si $m_{11} = 1$, en tanto que $d < 1$, V_1 prospera sin cambios. La condición *necesaria y suficiente* para que el proceso evolutivo tenga lugar es, entonces,

$$½ < m_{11} < 1 \quad \text{y} \quad 0 \leq d_1 < 1. \qquad (3.25)$$

Si se cumple esta condición, luego, la cota inferior de la población de las variedades V_2 y V_3 en la primera generación será

$$⅔\,(1 - m_{11}) \cdot (1 - d_1)N.$$

Puesto que este número es, por lo menos, igual a 2, inferimos que la cota inferior de la estabilidad de la variedad madre está dada por

$$m_{11} \geq 3/(1 - d_1)N. \qquad (3.26)$$

Dado que la cota superior de m_{11} es 1, inferimos que para que tenga lugar un cambio de variedad es necesario que

$$N > 3/1 - d_1. \qquad (3.27)$$

Si la variedad madre tiene una tasa de mortalidad baja, un número de miembros tan pequeño como 4 puede dar lugar al proceso de diferenciación.

Las condiciones anteriores sólo son válidas para las variedades V_2 y V_3. Tal como se colige de las últimas ecuaciones (3.24), para que surja la variedad V_4 se debe cumplir una condición mucho más rigurosa, a saber,

(3.25) & $(m_{22} + m < 1)$ o, de forma equivalente, (3.25) & $(m_{21} + m_{24} > 0)$.

Por último, escribimos las ecuaciones evolutivas generales (3.7) para una generación (valor de t) dada. Utilizando la matriz de mutaciones (3.23) obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones de recurrencia lineales de primer orden:

$$N^1_{t+1} = 2(2m_{11} - 1)(1 - d_1) N^1_t + (1 - m_{22} - m)(1 - d_2) N^2_t + (1 - m_{22} - m)(1 - d_3) N^3_t + \frac{2(1 - m_{11})(1 - m_{22} - m)}{3 - m_{22} - m}(1 - d_4) N^4_t$$

$$N^2_{t+1} = 2(2m_{22} - 1)(1 - d_2) N^2_t + \frac{2(1 - m_{11})}{3 - m_{22} - m}(1 - d_1) N^1_t + 2m(1 - d_3) N^3_t + \frac{2(1 - m_{11})}{3 - m_{22} - m}(1 - d_4) N^4_t$$

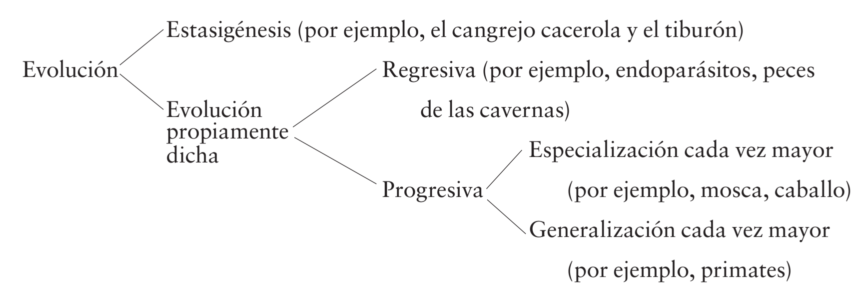
$$N^3_{t+1} = 2(2m_{33} - 1)(1 - d_3) N^3_t + \frac{2(1 - m_{11})}{3 - m_{22} - m}(1 - d_1) N^1_t + 2m(1 - d_2) N^2_t + \frac{2(1 - m_{11})}{3 - m_{22} - m}(1 - d_4) N^4_t$$

$$N^4_{t+1} = 2(2m_{44} - 1)(1 - d_4) N^4_t + \frac{2(1 - m_{11})(1 - m_{22} - m)}{3 - m_{22} - m}(1 - d_1) N^1_t + (1 - m_{22} - m)(1 - d_2) N^2_t + (1 - m_{22} - m)(1 - d_3) N^3_t.$$

Ésta es la clase de problemas de álgebra lineal que les encanta a los ordenadores. Pero su solución no reviste ningún interés filosófico. Los que sí son de interés filosófico son los siguientes puntos. Primero, las ecuaciones generales de evolución (3.7) se pueden transformar, de la sola caja negra descriptiva que constituyen, a un modelo mecanísmico que represente el proceso de mutación y selección, un modelo capaz de hacer predicciones precisas sobre determinada línea evolutiva. Segundo, ésta es una peculiaridad no de nuestro problema, sino de la teoría sintética de la evolución, la cual no es una teoría predictiva, a menos que se le adjunten datos precisos e hipótesis referentes a la constitución genética y el entorno de los organismos de interés. (Volveremos a este problema en el Volumen 6).

3.6. El bioprogreso

Los biólogos evolutivos coinciden en que todos los organismos complejos modernos descienden de organismos primitivos: recuérdese la Figura 3.2. Por tanto, parecería no haber dudas acerca de que la evolución ha sido progresiva. Pero no nos tenemos que apresurar. En primer lugar, habitualmente se distinguen las siguientes clases de proceso evolutivo:



Por consiguiente, algunos linajes han progresado durante ciertos períodos de tiempo, en tanto que otros no lo han hecho. El segundo problema es que no hay acuerdo en lo que respecta a la noción misma de bioprogreso; y con razón, ya que el progreso a través de una especialización cada vez mayor conduce, indefectiblemente, al estancamiento o a la extinción.

Se han propuesto diversas definiciones de bioprogreso (cf. Williams, 1966; Bowler, 1976). He aquí algunas de ellas: el bioprogreso es dife-

renciación histológica, aumento de la complejidad morfológica, supervivencia, adaptabilidad, independencia del entorno o cantidad de información genética cada vez mayores. Todas estas propuestas presuponen que el progreso es global antes que parcial (en aspectos particulares) y ninguna de ellas se presta fácilmente a la cuantificación. En particular, la definición en términos de la teoría de la información es pseudocuantitativa, puesto que no hay ninguna forma precisa y objetiva de medir o calcular la «cantidad de información almacenada en un organismo» (Lwoff, 1962; Apter y Wolpert, 1965). Después de todo, los biosistemas no son idénticos a sus genomas y éstos son más que sólo dispositivos de procesamiento de la información.

Supondremos que el bioprogreso consiste en aumentar el biovalor y pasaremos a refinar la distinción (Ayala, 1974) entre progreso uniforme (constante), por una parte, y progreso global (neto, promedio) por otra. En nuestra dilucidación nos serviremos del concepto de descendencia de sistemas (Definición 1.16(v)) y de la Definición 3.9 de biovalor. Puesto que formulamos el primero para los sistemas en general, antes lo adaptaremos a las biopoblaciones; esta adaptación incluirá la idea de colección variable, es decir, una colección cuya composición es cambiante (Volumen 3, Definición 5.13). Comencemos, entonces, con la

DEFINICIÓN 3.15 Sea $\mathcal{P} = \{p_t \mid t \in T\}$ una familia de biopoblaciones de cierta clase, indizada por el tiempo (T). Para todo $p_0, p_t \in \mathcal{P}$, donde $t > 0$,

(i) p_t *desciende* de p_0, o $p_0 \prec p_t$, sii todos los miembros de p_0 descienden de algún miembro de p_0;

(ii) la *descendencia* [o *progenie*] de p_0 es la familia de biopoblaciones que descienden de p_0:

$$P\ (p_0) = \{p_t \in \mathcal{P} \mid p_0 \prec p_t\}.$$

A continuación, añadiremos la idea de que, si x e y son poblaciones sucesivas, x constituye una mejora con respecto a y, en cierto aspecto z, si x se desempeña mejor que y en la realización de z. Expresado con mayor precisión, proponemos la

DEFINICIÓN 3.16 Sea p_0 una biopoblación de organismos de cierta clase K, y llamemos $P\ (p_0)$ a la descendencia de p_0. Además, llamemos Σ a cierta clase de subsistemas (por ejemplo, órganos) de todos los miembros

de p_t pertenecientes a P (p_0), y supongamos que todos los subsistemas de esa clase realizan (aproximadamente) las mismas funciones. Luego,

(i) los K han *progresado de manera global* con respecto a Σ, entre p_0 y p_t para $t \geqslant 0$, sii el valor del subsistema de la clase Σ para los miembros de p_t es significativamente mayor que su valor para los miembros de p_0;

(ii) los K han *progresado de manera uniforme* a través de P (p_0) con respecto a Σ entre p_0 y p_t para $t \geqslant 0$, sii el valor del subsistema de la clase Σ para los miembros de toda población p_u perteneciente a P (p_0), entre p_0 y p_t, es mayor que su valor para los ancestros inmediatos de los p_{u}.

Mientras que la primera cláusula dilucida la noción de progreso neto o promedio, la segunda aclara la de progreso uniforme. Éste implica al progreso neto, pero no a la inversa: vale decir, en un linaje progresivo puede que haya retrocesos temporales.

Por último, formularemos la

DEFINICIÓN 3.17 Según la nomenclatura y los supuestos dados por la Definición 3.16, los K han *progresado de manera global* entre p_0 y p_t sii el valor de todas las funciones de los miembros de p_t es mayor que el valor de la correspondiente función para los miembros de p_0.

Comentario 1 Las definiciones anteriores no distinguen entre el progreso en un entorno aproximadamente constante –y, en consecuencia, a expensas de una selección severa– y la mejora accidental de las condiciones ambientales (es decir, la preadaptación). *Comentario 2* Nuestras definiciones suponen el concepto de biovalor y, por consiguiente, el de bondad. En efecto, x es *bueno* para $y =_{df}$ el valor de x para y es positivo. Con todo, en nuestro sistema, estos conceptos son biológicos, porque hemos definido «biovalor» en términos exclusivamente biológicos (Definición 3.9). En lugar de introducir un concepto antropomórfico de valor en la biología, hemos intentado derivar un concepto objetivo de valor a partir del concepto biológico de salud de un biosistema.

Dejemos las definiciones. Ya es tiempo de que nos comprometamos. ¿La evolución supone progreso? Y, si la respuesta es afirmativa, ¿es ese progreso universal y global o local y parcial? Según algunos filósofos y biólogos, desde Aristóteles hasta Lamarck, la bioevolución supone un progreso lento y gradual hacia la perfección. Esta hipótesis presupone que el entorno se ha mantenido constante durante más de cuatro mil millones de años, o que ha cambiado en beneficio de todas las especies. Tal presuposición ha sido refutada por las pruebas de la deriva continental,

las glaciaciones, la desertificación, los terremotos y el agotamiento de diversos recursos. En tanto que algunos de esos cambios han resultado favorables para ciertas especies (las que estaban preadaptadas a los nuevos entornos) y hasta para la emergencia de nuevas especies, para otras han resultado mortales. En todo caso, la mayoría de las especies se ha extinguido, no han persistido en el camino hacia la perfección.

Otra presuposición de la hipótesis del progreso universal y global es que existe una finalidad fija –un ideal o paradigma– hacia el cual se dirigen las sucesivas generaciones. Esta hipótesis sería razonable en una biología platónica, en la cual el arquetipo es perfecto y todos los organismos reales son una suerte de borroso calco de aquél. Pero, por supuesto, la biología platónica no existe, aunque haya algunos vestigios de platonismo en la biotaxonomía. La noción misma de un objeto inmaterial –tal como la idea del Mosquito Perfecto– que guía la evolución de las cosas concretas es incongruente con la ontología de la ciencia moderna. (Cf. Volumen 3, Introducción y Capítulo 2). Además, puesto que el entorno cambia de manera bastante errática y, en ocasiones, drástica, si hubiera un objetivo, ese objetivo sería móvil, no fijo, y por ello los procesos evolutivos avanzarían en zig zag, no en una dirección determinada.

En resumidas cuentas, la biosfera no obedece la llamada «ley del progreso». El progreso, *cuando acontece*, es una tendencia, no una ley, y se trata de una tendencia que se presenta en *algunos* linajes, en *algunos* aspectos y por *algún* tiempo. En la biosfera, al igual que en la sociosfera, no sólo hay progresistas (por ejemplo, los mamíferos), sino también conservadores (por ejemplo, las hormigas) y reaccionarios (por ejemplo, los piojos). Además, mientras que muchos progresistas se han extinguido, algunos conservadores todavía andan por ahí: los cambios ambientales drásticos y la competencia feroz pueden hundir las carreras más brillantes.

Por todas las razones aducidas, lo máximo que podemos afirmar es el

POSTULADO 3.5 Todas las bioespecies progresan en algunos aspectos durante algunos períodos y en ciertos entornos.

Vale decir, el bioprogreso es a menudo real, pero siempre parcial, relativo y temporal. Es *parcial* porque una mejora en cierto(s) aspecto(s) puede constituir un retroceso en otro(s); por ejemplo, un aumento de tamaño puede conferir mayor fortaleza, pero a la vez exige un consumo mayor de energía y permite una movilidad menor. El progreso es *relativo* al entorno y, además, puede ser activo o pasivo: conseguido por medio

de las mutaciones y la selección o gracias a la lotería de los cataclismos ambientales. El progreso, finalmente, es *temporal*, o limitado a períodos de tiempo determinados, en lugar de eterno.

4. Comentarios finales

Las biometafísicas tradicionales son el vitalismo y el mecanicismo. La fortaleza del primero se encuentra en su capacidad de hacer preguntas, algunas de ellas pertinentes, que el segundo no consigue responder. En tanto que el vitalismo clásico no se ha desarrollado, el mecanicismo sí lo ha hecho. En la actualidad hay dos clases de mecanicismo que son populares: (*a*) el fisicoquimismo, es decir, la tesis de que los organismos no son más que sistemas fisicoquímicos y (*b*) el maquinismo, o sea, la tesis de que los organismos son sistemas semejantes a las máquinas, que como consecuencia de ello están moldeados según un diseño o plan y que su comportamiento está guiado por finalidades.

El fisicoquimismo es heredero del mecanicismo tradicional y el maquinismo es un híbrido del mecanismo y el vitalismo. Mientras que el modelo del primero es el reactor químico, el del segundo es el ordenador. Ninguna de estas metafísicas es congruente con la totalidad de la biología, si bien el fisicoquimismo ha sido fructífero allí donde el maquinismo ha resultado estéril. El primero es incompatible con la biología porque niega la emergencia y los niveles, en tanto que el segundo lo es porque da por supuestos planes y finalidades que no existen.

La alternativa que proponemos es el *biosistemismo*, o sea, la aplicación del sistemismo (Capítulo 1, Sección 4.2) al estudio de la vida. El biosistemismo reconoce que el *bios* es un nivel emergente arraigado en el nivel químico. Por consiguiente, admite la diferencia entre cosas vivientes y no vivientes –negada, por ejemplo, por Pirie (1960), Kendrew (1966) y Keosian (1968)– así como admite la explicación biológico-molecular del autoensamblaje de los biosistemas a partir de sus precursores bioquímicos y la teoría de la evolución mediante cambios génicos y selección natural.

Nos vemos, por ende, ante cuatro biometafísicas, cada una con su círculo de problemas, su método y su objetivo correlativos: véase la Tabla 3.1. La más antigua y persistente de estas metafísicas es el vitalismo, la cual es, también, la biofilosofía más difundida. En realidad, hay dos

clases de vitalismo: el ontológico y el metodológico. El primero afirma que los organismos se distinguen por poseer cierto principio inmaterial, mientras que el segundo sostiene que son tan complejos y variables que no se los puede investigar con los métodos corrientes de la ciencia. El vitalismo ontológico fue declarado muerto ya hace mucho tiempo, aun por biólogos que caen en él de forma continua, como en el caso de Monod (1970) y Jacob (1970), cuando fantasean acerca del *project téléonomique* de cada organismo. En cambio, la afirmación de que no es posible estudiar los organismos con el método científico corriente, sino que es necesario un método especial (es decir, el vitalismo metodológico), todavía pervive, salvo entre los biólogos moleculares (Bunge, 1973a, Capítulo 3).

En cuanto al maquinismo, su tesis característica es que los organismos son como máquinas por cuanto poseen un diseño o plan y una finalidad. Sin embargo, debemos distinguir dos clases de maquinismo: el verbal y el serio. El maquinismo verbal se limita a repetir de manera acrítica la analogía organismo-máquina y a advertir que la biología puede aprender más de la ingeniería que de la física o la química (Polanyi, 1968). Se puede descartar esta clase de maquinismo si se admite que la biología no posee ni un solo enunciado legal, por no mencionar una teoría, que contenga los conceptos de plan (o diseño) y finalidad. (Ni siquiera el intento más serio de incorporar el concepto de orientación a fines en la biología, el de Sommerhoff (1974), consigue matematizar correctamente tal noción, además de lo cual tampoco ofrece ejemplos de leyes ni de teorías en los que ésta aparezca).

El maquinismo contemporáneo serio es heredero de Descartes y La Mettrie, y culminó con la teoría del autómata autorreplicable (von Neumann, 1966). Es una perspectiva muy difundida entre los informáticos, tal como puede comprobarse hojeando el *Journal of Computer and System Sciences*. Este enfoque ha estimulado, especialmente, las aplicaciones biológicas de la teoría de autómatas y de la teoría de la información. Sin embargo, tres décadas de trabajo en esta dirección han producido escasos resultados: en particular, no ha hecho contribuciones a la revolución de la biología molecular ni a la biología evolutiva. No es algo que sorprenda, ya que el maquinismo pasa por alto el nivel químico e ignora la historia: piensa en términos de sistemas instantáneos, en lugar de hacerlo en términos de reacciones enzimáticas o de selección natural.

El maquinismo combina el lado negativo del mecanicismo (el reduccionismo descendente) con el lado negativo del vitalismo (el reduc-

cionismo ascendente). Su única virtud es la claridad. No cabe duda de que ha estimulado el diseño y la construcción de ingeniosas imitaciones de organismos, tales como la tortuga mecánica de Grey Walter. Con todo, puesto que estos artefactos son muy diferentes de la cosa real que simulan, no nos enseñan mucho acerca de ella. Las únicas utilidades de estas biosimulaciones son las de ser juguetes o esclavos. En resumen, el maquinismo es incorrecto porque ignora que los organismos están compuestos por sistemas químicos, no por sistemas electromagnéticos, además de lo cual les asigna una propiedad que muy pocos animales poseen, a saber, la de perseguir fines, y otra que no posee ninguno: la del diseño óptimo o perfección.

TABLA 3.1
Cuatro enfoques en el estudio de la vida

		Mecanicismo		
	Vitalismo	Maquinismo	Fisicoquimismo	Biosistemismo
Marco ontológico	La vida trasciende la materia y está guiada por un principio inmaterial.	Los organismos son como las máquinas: tienen planes y fines.	Los organismos son sistemas fisicoquímicos.	Los organismos son sistemas sui géneris compuestos por sistemas bioquímicos y poseen propiedades y leyes emergentes.
Círculo de problemas	Preguntas de tipo '¿Para qué sirve?'.	Preguntas de tipo '¿Para qué sirve?' y '¿Cómo funciona?'.	Preguntas de tipo '¿Cómo está compuesto?' y '¿Cuáles son sus propiedades?'.	Todos los problemas biológicos, especialmente los referentes a los subsistemas, su autoensamblaje y su evolución.
Método	Descripción del organismo como totalidad.	Métodos fisicoquímicos más construcción de análogos.		Toda la colección de métodos particulares de las diferentes ramas de las ciencias naturales.
Objetivos	Comprensión intuitiva de la totalidad.	Explicación y pronóstico de tipo tecnológico.	Explicación y predicción fisocoquímicas.	Explicación y predicción biológicas.

Con referencia al fisicoquimismo, no cabe duda de que ha sido fértil para la biofilosofía. Y lo que es más, ha estimulado el nacimiento de ramas íntegras de la ciencia, tales como la biofísica, la bioquímica, la biología molecular y la bioingeniería. En particular, puede que la biología molecular no hubiera visto la luz si no hubiese sido por la hipótesis de que las reacciones químicas (especialmente las reacciones enzimáticas) constituyen la base, si no el meollo, de la vida. En todo caso, esta conjetura desencadenó, entre otras cosas, la teoría química de la herencia, que constituyó la etapa inicial de la biología molecular. (Por otro lado, el fisicalismo, que intentó obviar el nivel químico, no hizo ninguna aportación a los acontecimientos que culminaron con el descubrimiento de la doble hélice y el «código» genético: véase Olby, 1974. Esto no supone negar que la física, especialmente la cristalografía por rayos x, haya sido indispensable. Pero una cosa es la utilización de técnicas físicas y otra muy diferente la concepción de que los organismos no son más que sistemas físicos).

La biología molecular, hija en gran medida de la rama fisicoquimista de la biometafísica, ha ido más allá en la revelación de la base química de la vida: ha probado que numerosas propiedades que solían considerarse típicamente biológicas –tales como el metabolismo y la autoduplicación– son, en realidad, bioquímicas. Sin embargo, en su afán por desembarazar del mito a la biología y explicarla en términos de la química, los biólogos moleculares a menudo han hecho hincapié en la composición a expensas de la organización o estructura, y han enfatizado la herencia en desmedro del entorno. Por consiguiente, a menudo han pasado por alto la estructura multinivel de los organismos: orgánulo, célula, órgano, organismo pluricelular. Por tal motivo, aunque es indispensable para la explicación de la evolución, la biología molecular no basta: el fenotipo y el entorno son tan importantes como el genotipo. Después de todo, el hombre y el chimpancé casi no pueden distinguirse al nivel bioquímico: véase la Figura 3.7.

Ya para finalizar, el vitalismo resulta insostenible, pero nos ha legado dos principios verdaderos e importantes:

V1 La vida es emergente: trasciende el nivel fisicoquímico.

V2 La biosfera posee una estructura de niveles («jerárquica») que parte de la célula, pasa por el órgano, el organismo y la población, y llega al ecosistema.

El fisicoquimismo niega estos principios, pero aporta dos hipótesis verdaderas e importantes:

M1 La vida emergió mediante el autoensamblaje de macromoléculas.

M2 Algunas leyes físicas y químicas siguen funcionando en los organismos.

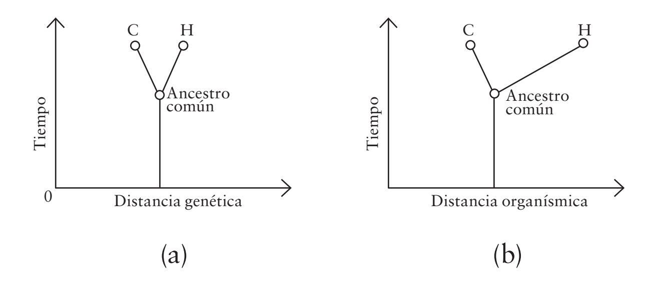


Figura 3.7. Desde el punto de vista genético, los humanos (H) y los chimpancés (C) son aproximadamente tan diferentes como dos subespecies de ratones (*a*). Sus diferencias se presentan, principalmente, a nivel de los órganos (*b*), especialmente en relación con el sistema nervioso y, por consiguiente, con el comportamiento. Véase King y Wilson (1975).

El biosistemismo adopta los cuatro principios mencionados y les añade otros que le son peculiares:

S1 Los organismos son sistemas compuestos por sistemas bioquímicos y poseen propiedades emergentes.

S2 Cada nivel de la biosfera posee sus propias leyes: leyes celulares, organísmicas, poblacionales y ecosistémicas.

S3 Las unidades de estudio de la biología son el organismo en su entorno y sus diversos subsistemas (moléculas, células, órganos) y supersistemas (población, ecosistema, biosfera).

Hasta aquí llegamos con la ontología del biosistemismo. En cuanto a su metodología, es el reduccionismo gnoseológico, el cual es perfectamente compatible con el pluralismo ontológico (Bunge, 1977f) y se reduce a la

REGLA 3.1 Se debe estudiar cada bioentidad en su propio nivel y se la debe explicar sirviéndose de los niveles contiguos.

Por consiguiente, no sólo se debe estudiar un órgano en su propio nivel, sino que también se lo debe analizar en sentido descendente (en términos de sus subsistemas) y en sentido ascendente (en términos del organismo como totalidad en su entorno). Esto vale, en particular, para el cerebro humano, el cual no sólo es un sistema neural, sino que también es un subsistema de un componente de sistemas sociales. Pero ésta es la historia que contaremos en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

La mente

Este capítulo se ocupa de uno de los problemas más antiguos, fascinantes y pertinaces de los que se encuentran en la intersección entre la filosofía y la ciencia: el llamado problema mente-cerebro. Se trata de un sistema de preguntas acerca de la naturaleza de la mente y de sus relaciones con la materia.

Algunos pensadores prominentes –de manera notable, Spencer (1862), E. du Bois-Reymond (1872) y Popper y Eccles (1977)– han declarado insoluble este problema. Yo sostengo que parte del problema es que, por lo general, se lo formula en términos poco adecuados, a saber, los del lenguaje corriente. Éstos son inadecuados no sólo porque el lenguaje ordinario es notablemente pobre e inexacto, hasta el extremo de tener escasa utilidad en la investigación del problema de la materia, sino también porque conllevan una petición de principio. En efecto, las lenguas europeas cargan con una solución preconcebida al problema de la mente, a saber, la propia del dualismo psicofísico, o doctrina de que la mente es algo aparte de la materia. La expresión misma 'problema mente-cerebro' sugiere que la mente y el cuerpo son dos entidades distintas a un mismo nivel, vale decir, que son cosas. En consecuencia, debemos buscar inspiración en la ciencia.

En ciencia no nos referimos al problema movimiento-cuerpo, al problema reacción-sustancia, al problema digestión-tracto digestivo ni al problema movilidad-sociedad. Hablamos, en cambio, del movimiento *de* los cuerpos, la reacción *de* los compuestos químicos, las funciones

digestivas *del* tracto digestivo y de la movilidad *de* una sociedad. No reificamos las propiedades, los estados o los sucesos, salvo cuando se trata de propiedades, estados o sucesos del sistema nervioso. Cerraremos esta brecha, que mantiene al estudio de la mente como una anomalía científica, en las garras de un mito, mediante la sustitución del lenguaje corriente por el lenguaje del espacio de estados, el cual es matemáticamente preciso y compartido por la ciencia y la ontología científica.

Otra dificultad que plaga el llamado problema mente-cuerpo es el de la suma juventud de la neurociencia: recordemos que la hipótesis neuronal de Ramón y Cajal tiene menos de un siglo. No cabe duda de que en la antigüedad hubo importantes descubrimientos esporádicos, empezando por la hipótesis de Hipócrates de que el cerebro –en lugar del corazón o el hígado– es el órgano de la emoción y el pensamiento. Sin embargo, sólo en años recientes se ha lanzado un abordaje coordinado en todos los niveles (Worden y otros, 1975).

La tercera dificultad consiste en que, lejos de ser un problema exclusivamente científico, se trata de un problema que también es filosófico. En realidad, se trata de un problema metafísico tradicional que ha suscitado una gran pasión y, por ende, la mayor de las cautelas. Además, su propia formulación presupone diversas nociones que distan de estar claras en la metafísica tradicional, en particular, las de sustancia, propiedad, estado, suceso, emergencia y nivel de organización. Por consiguiente, toda discusión acerca de si existe o no una sustancia mental, o de si los estados mentales son o no son estados cerebrales, exige una dilucidación previa de los conceptos generales de sustancia y estado, trabajo que la mayoría de los filósofos no se preocupa por realizar.

Cuarto y último, otro motivo del estado de retraso en la investigación del llamado problema mente-cuerpo es que no sólo pertenece a la ciencia y la filosofía, sino también a la ideología. En efecto, todas las religiones y algunas ideologías políticas tienen un interés particular en este problema, y algunas de ellas hasta afirman que es de su exclusiva propiedad. Como consecuencia, lejos de tener interés en la investigación del problema, están ansiosos por que aceptemos su particular solución instantánea.

En resumidas cuentas, ha habido numerosos obstáculos en el camino de la investigación científica del problema. Por fortuna, algunos de estos obstáculos están desapareciendo con bastante rapidez y la ciencia de la mente, es decir, la psicología, está avanzando a grandes pasos. Hay tres enfoques, antes separados, que actualmente convergen en este

problema: la neurociencia, la psicología y la filosofía. En efecto, en las últimas décadas los neurofisiólogos y los neurólogos han comenzado a estudiar las funciones mentales de los sistemas neurales, los psicólogos fisiológicos han empezado a desvelar los mecanismos neurales que «median» el comportamiento y los filósofos han iniciado el análisis de algunos de los conceptos clave incluidos en el tema, y también han empezado a repasar la antigua doctrina de que las funciones mentales son una clase de funciones corporales. La ciencia de la mente tiene por delante un largo camino que recorrer antes de alcanzar la madurez, pero finalmente ha dado sus primeros pasos.

Este capítulo, como los demás que componen el libro, sólo ofrecerá un marco general, pero desde luego, será un marco general congruente con las ideas básicas de sistema, propiedad, ley y cambio que predominan en la ciencia y que hemos expuesto anteriormente en esta obra.

1. El sistema nervioso central

1.1. Trasfondo filosófico

Habitualmente se dice que percibir, sentir, recordar, imaginar, desear y pensar son estados o procesos mentales. Puesto que ni en la ciencia ni en nuestra ontología hay estados o procesos independientes, sino sólo estados *de* una entidad y procesos que ocurren *en* una cosa, debemos preguntar *de cuál entidad* son los estados mentales y *en cuál cosa* acaecen los procesos mentales; en otras palabras, cuál es la cosa que percibe, siente, recuerda, imagina, desea y piensa. Éste es el meollo mismo del llamado problema cuerpo-mente, vale decir, la identificación del sujeto, o el referente, de los predicados mentalistas.

Quienes tienen la esperanza de que el problema mente-cuerpo sea soluble han propuesto dos soluciones. Según la primera, lo que realiza las funciones mentales (percibir, sentir, pensar, etc.) es la mente (alma o espíritu). De acuerdo con la segunda, es el cerebro. Según la primera, la mente es una entidad inmaterial en la cual tienen lugar todos los estados y procesos mentales: sentimientos, recuerdos, ideas y afines serían de (o tendrían lugar en) la mente, la cual, a su vez, sería una entidad aparte del cuerpo. De acuerdo con la segunda respuesta, la mente no es una entidad aparte, sino un conjunto de funciones cerebrales: percibir,

imaginar, pensar y afines serían procesos cerebrales. La primera tesis se llama *dualismo psicofísico*, la segunda *materialismo* o *naturalismo*.

Pero hay cierto número de variedades de dualismo y de materialismo. (Cf. Vesey, 1964; Smythies, 1965; Armstrong, 1968; O'Connor, 1969; Borst, 1970; Popper y Eccles, 1977; Margolis, 1978). En este capítulo, nuestra principal tarea no consiste en analizarlas, sino en formular una versión del materialismo que sea consistente con los principios establecidos en los capítulos anteriores y en el Volumen 3 de esta obra. Se trata del *materialismo emergentista*, la doctrina según la cual (*a*) todos los estados, sucesos y procesos mentales son estados de, o sucesos y procesos que acaecen en, el cerebro de los vertebrados; (*b*) esos estados, sucesos y procesos son emergentes relativamente a aquellos de los componentes celulares del cerebro y (*c*) las llamadas relaciones psicofísicas (o psicosomáticas) son interacciones entre diferentes subsistemas del cerebro o entre aquéllos y otros componentes del organismo (Bunge, 1977e). Esta clase de materialismo es monista con respecto a la sustancia y pluralista con respecto a las propiedades.

He aquí algunas razones para inclinarse por el materialismo emergentista:

(i) dado que evita la fantasmal sustancia mental sin negar por ello los hechos mentales, el materialismo emergentista es *compatible con el enfoque científico*;

(ii) el materialismo emergentista *carece* –como esperamos probar– *de la confusión que caracteriza al dualismo*, con su discurso acerca de una mente inmaterial y de las «correlaciones» entre ésta y el cuerpo;

(iii) a diferencia del dualismo, el materialismo emergentista es *consistente con los conceptos generales de estado y suceso que pueden colegirse a partir de todas las ciencias*. (En cambio, según el dualismo, los estados mentales serían los únicos estados que no serían estados de una cosa y los sucesos mentales serían los únicos sucesos que no consistirían en cambios de estado de una cosa. Éste es el motivo por el cual el dualismo está más de acuerdo con la teología que con la ciencia).

(iv) A diferencia del dualismo, el materialismo emergentista *promueve la interacción entre la psicología y las demás ciencias*, en particular con la neurociencia, y la razón de ello es, precisamente, su concepción de los sucesos mentales como sucesos biológicos especiales;

(v) a diferencia del dualismo, que abre un abismo imposible de atravesar entre el hombre y el animal, el materialismo emergentista *coincide*

con la biología evolutiva, la cual –mediante el descubrimiento del desarrollo gradual de las facultades mentales a través de ciertos linajes– refuta la autocomplaciente superstición de que únicamente el Hombre está dotado de una Mente;

(vi) a diferencia del dualismo, que postula una mente inmutable, el materialismo emergentista *coincide con la psicología del desarrollo* y la neurofisiología, las cuales muestran la maduración gradual del cerebro y del comportamiento.

El único inconveniente del materialismo emergentista es que, hasta hoy, no ha sido formulado de manera precisa y en detalle. En efecto, el materialismo emergentista es poco más que una hipótesis programática con una inmensa capacidad heurística. Intentaremos remediar ese inconveniente en lo que queda de este capítulo, construyendo una teoría general de la mente que no sólo sea consistente con nuestros principios ontológicos, sino también con la neurociencia y la psicología actuales.

1.2. Las unidades neurales

En este capítulo nos ocuparemos de los sistemas de una clase especial, a saber, de los organismos provistos de sistema nervioso. Además, prestaremos particular atención a los organismos que poseen un sistema nervioso central o, para abreviar, SNC. Existen sistemas nerviosos de diverso grado de complejidad, desde los de los primitivos gusanos –con una docena de neuronas–, pasando por los de los insectos –con alrededor de 10.000–, hasta los de los seres humanos, que tienen aproximadamente 100.000 millones (vale decir, 10^{11}) de neuronas. Los respectivos niveles de comportamiento van desde el automático hasta el muy creativo, y las variedades de vida interior desde la nula hasta la sumamente rica. Dado que, por lo general, se admite que las formas inferiores de funcionamiento del sistema nervioso y el comportamiento animal pueden explicarse en términos estrictamente biológicos, nos concentraremos en las funciones superiores, vale decir, en aquellas que, según la creencia popular, requieren de la presencia de un alma, espíritu o mente que es inaccesible para la ciencia.

En un SNC pueden distinguirse los siguientes niveles:

Subcelular: membranas neuronales, botones sinápticos, dendritas.

Celular: neuronas y células de la glía.

Microsistemas neurales: sistemas multineuronales (ensamblados fijos o itinerantes, de miles o millones de neuronas en los primates).

Macrosistemas neurales: sistemas de miles de microsistemas neurales. En los primates, se pueden distinguir los siguientes:

Corteza no comprometida, sistemas somestésicos, sistemas visuales y auditivos, sistema de termorregulación, etc.;

hemisferios cerebrales;

cerebro;

sistema nervioso central (SNC), o cerebro más médula espinal;

sistema neuroendocrino (SNE), o sistema nervioso más glándulas endocrinas (por ejemplo, hipófisis y adrenales).

Presuntamente, en todos los procesos mentales participan millones de neuronas y no acontecen solamente a nivel del sistema neural, sino también en los niveles celular y subcelular. Además, dado el fuerte acoplamiento entre el SNC y el resto del cuerpo, todo acto mental incluirá otros tejidos de naturaleza no nerviosa. Por ejemplo, el movimiento voluntario es una actividad no sólo de ciertos sistemas neuronales, sino también de ciertos músculos y ciertas glándulas endocrinas. Por consiguiente, aunque es posible distinguir los diversos sistemas neurales (micro y macro) entre sí, no se los puede separar unos de otros ni del resto del cuerpo. Son ellos los que realizan las actividades mentales, pero no lo hacen aisladamente del resto de los subsistemas del cuerpo.

Mientras que algunos sistemas neurales poseen componentes permanentes, otros no los tienen. Así pues, el sistema visual posee una composición constante, vale decir, está compuesto por subsistemas anatómicamente identificables: los ojos, los nervios ópticos, los tractos ópticos, los núcleos geniculados laterales y la corteza visual. Puede que otros sistemas neurales no tengan componentes constantes y, por ende, es posible que el cirujano no los distinga: lejos de poseer una localización constante, puede tratarse de ensamblados neuronales itinerantes que sólo se forman para la ocasión (Craik, 1966; Bindra, 1976). Véase la Figura 4.1.

Llamaremos *psicón* a toda unidad neural capaz de desempeñar funciones mentales de alguna clase. Existen tres concepciones principales respecto de la naturaleza y el tamaño de los psicones: el neuronismo, el holismo y el sistemismo. Según el primero, una neurona particular puede poseer ciertas capacidades mentales, por ejemplo, la de emitir

órdenes. No hay pruebas que apoyen esta concepción. Los holistas, en cambio, suponen que el único que puede desempeñar funciones mentales es el cerebro como totalidad: hablan de una «acción en masa» y se inclinan por las teorías holográficas de la memoria y otras funciones mentales. Si bien hay abundantes pruebas de un fuerte acoplamiento entre ciertos sistemas neurales, también hay pruebas de la localización de, por ejemplo, el placer y el habla.

Nos queda, por consiguiente, el *psicosistemismo*, la hipótesis de que el cerebro, en lugar de ser un montón de unidades autosuficientes o una gelatina homogénea, es un *sistema de subsistemas* (o de *órganos*) *especializados*, algunos de los cuales son itinerantes en vez de fijos. Hay abundantes pruebas a favor del psicosistemismo, así que adoptaremos esta perspectiva. Además, es congruente con nuestra concepción sistemista del mundo, a más de lo cual sugiere la estrategia de investigación más fructífera, a saber, la de estudiar el cerebro como totalidad y, a la vez, todos y cada uno de sus subsistemas, sus acoplamientos mutuos y sus vínculos con los subsistemas no neurales, en particular con el sistema endocrino.

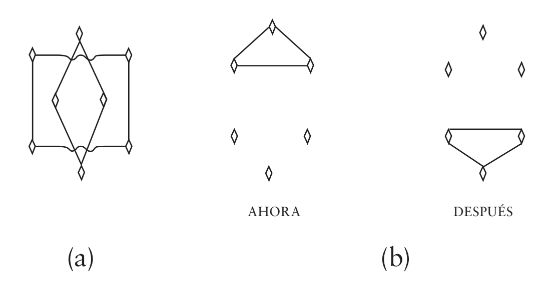


Figura 4.1. (*a*) Dos microsistemas neurales que ocupan aproximadamente la misma región espacial, pero están funcionalmente separados: «se encargan» de funciones diferentes. (*b*) Los psicones pueden ser itinerantes aun cuando sus componentes permanezcan en el mismo sitio, a causa de que sus conexiones cambian con el transcurso del tiempo.

El enfoque sistémico del SNC es necesario, pero insuficiente: también tenemos que tener en cuenta el desarrollo y la evolución. El dualismo considera que la mente es una entidad invariable, por lo que sostiene que las personas conservan su «identidad personal» durante toda su vida. Sin embargo, las pruebas empíricas contradicen esta tesis: el humano recién nacido casi no tiene mente, tras unos cuantos meses ya ha

aprendido algunos trucos y continúa aprendiendo hasta que aparece la senilidad. En resumen, el SNC de los vertebrados es plástico. Además, ha evolucionado a partir de inicios modestos. Quienes creen en el mito de la mente inmaterial tienen que ignorar las pruebas de que la mente ha evolucionado junto con otras funciones corporales. Por consiguiente, nosotros ignoraremos el mito dualista de la identidad personal: sostendremos, en cambio, que lo único constante de Perico Pérez es su nombre.

1.3. Definiciones iniciales

Comenzaremos formulando la

DEFINICIÓN 4.1 Un *animal* es un organismo que

(i) se alimenta de otros biosistemas,

(ii) puede moverse como totalidad hacia ciertos estímulos o en dirección contraria a ellos,

(iii) puede explorar su entorno en busca de alimento, agua o estimulación, o evitar los estímulos que podrían perjudicar su salud.

A continuación definiremos un sistema nervioso como un biosistema informativo de un animal. En la bioquímica y en la biología celular podemos y debemos arreglárnoslas sin el concepto de información, pero no es así cuando tratamos con organismos provistos de sistema endocrino ni, mucho menos, de sistema neuroendocrino. En este caso, las entradas ambientales e internas no son sólo transferencias de energía que carecen de especificidad, sino que a veces también originan señales específicas que transmiten información precisa acerca de los sucesos. En efecto, hay un código –uno que ha evolucionado naturalmente, desde luego– definido mediante el cual los estímulos de cierta clase (por ejemplo, térmicos) son «traducidos» (transducidos) en el organismo a impulsos nerviosos; estas señales, a su vez, activan otros componentes, por ejemplo, músculos o glándulas. Se trata de señales propiamente dichas, no sólo de flujos de energía neutros: transportan información y desencadenan la liberación de cantidades de energía mucho mayores que la que transportan. El sistema nervioso es, en suma, una auténtica red de información, puesto que detecta, genera y transmite información según ciertos códigos naturales definidos. Por consiguiente, formulamos la

DEFINICIÓN 4.2 Un sistema es un *sistema nervioso* sii es un biosistema informativo (vale decir, un sistema viviente de detección y procesamiento de señales), tal que

(i) está compuesto por células (vivientes),

(ii) es o ha sido una parte propiamente dicha de un animal pluricelular (vale decir, el complemento de éste en el entorno inmediato del sistema),

(iii) su estructura incluye (*a*) la regulación, o control, de ciertas biofunciones del animal y (*b*) la detección de sucesos internos y ambientales, así como la transmisión de señales desencadenadas por esos sucesos.

DEFINICIÓN 4.3 Un biosistema es un sistema *neural* (o *neuronal*) sii es un subsistema de un sistema nervioso.

DEFINICIÓN 4.4 Un biosistema es una *neurona* sii es un componente celular de un sistema neural.

Comentario 1 El sistema nervioso de los vertebrados posee una tercera propiedad estructural: interacciona en forma directa con todos los demás sistemas del animal. Además, el SNC de los vertebrados superiores es más que un procesador de información: también es un generador de información. Más sobre esto en la Sección 4.5. *Comentario 2* Los circuitos y los ganglios neurales, los ensamblados celulares (Hebb, 1949) y las poblaciones de neuronas (Freeman, 1973), las constelaciones de trabajo (Luria, 1966) y los sistemas neurales itinerantes o *pexgos*# (Bindra, 1976) son sistemas neurales y, por ende, columnas de neuronas corticales (Mountcastle, 1957; Powell y Mountcastle, 1959; Hubel y Wiesel, 1963). *Comentario 3* Es probable que los sistemas neurales capaces de percibir señales, imaginar o desear estén compuestos por millones o miles de millones de neuronas. Sin embargo, aun los sistemas neuronales compuestos de unas cuantas neuronas poseen propiedades de las cuales sus componentes carecen, vale decir, propiedades emergentes. En consecuencia, los sistemas neuronales son entidades ontológicamente irreducibles, aun cuando sean (hasta cierto punto) epistémicamente reducibles, es decir, explicables en términos de su composición y estructura. *Comentario 4* El comentario anterior rebate el argumento dualista acerca de que, puesto

Acrónimo de ***p**resently **ex**cited **g**nostic **o**rganization*, expresión que puede traducirse de manera no literal como «organización cognitiva actualmente excitada». [N. del T.]

que (para el ojo sin entrenamiento) todas las neuronas se ven iguales, no se les puede asignar la diversidad de funciones que les atribuyen los monistas. En realidad, no hay dos neuronas iguales entre sí. Y aunque las hubiera, sabemos que forman sistemas (en particular, columnas) y que, como sabe todo niño que tenga experiencia con juguetes de construcción, como Lego o Meccano, la variedad de sistemas que se pueden formar con unos cuantos elementos es interminable. *Comentario 5* Prestarle atención exclusivamente a la neurona individual y su supuesta pauta de descarga «todo o nada» resulta engañoso, porque fomenta la concentración de la atención en procesos discontinuos, así como las analogías con los ordenadores digitales. Presuntamente, los procesos mentales involucran millones de neuronas y, por consiguiente, son procesos continuos o cuasicontinuos. Esto permite construir modelos continuos de los sistemas neurales (Rashevsky, 1972; MacGregor y Lewis, 1977). Además, refuta la llamada «objeción granular» a la hipótesis de la identidad psiconeural, la cual plantea que en tanto que los sucesos cerebrales son espacial y temporalmente discretos, podemos experimentar extensiones rojas continuas.

Los diversos sistemas neuronales difieren en su modo de conexión. Existen varios tipos de conexiones interneuronales e intersistémicas: constantes o fijas, variables de forma regular y variables de forma aleatoria. Para poder discutir la conectividad neural, conviene definir, primero, esta noción. Una manera de hacerlo es la que sigue. Llamemos $C_t(a, b)$ a la fortaleza de la conexión entre la neurona (o ensamblado neuronal) a y la neurona (o ensamblado neuronal) b de un sistema dado en el instante t. De forma general, $C_t(a, b) \neq C_t(b, a)$. La conexión $a - b$ es *excitativa* en t sii $C_t(a, b)$ es positiva, e *inhibitoria* sii $C_t(a, b)$ es negativa. La excitación o inhibición causada por la célula a en la célula blanco b es igual al producto de a multiplicado por $C_t(a, b)$. Y la entrada total a la célula b se obtiene sumando todas las entradas parciales (vale decir, sumando todas las a). La matriz $\|C_t(a, b)\|$ exhibe la conectividad total del sistema en el instante t. La conectividad de un sistema neural con un millón de neuronas se representa mediante una matriz 1.000.000 × 1.000.000 (agrupando los cientos de sinapsis de cada célula en un único cruce). Dado que utilizaremos este concepto intensamente, es conveniente que lo expongamos para futuras consultas:

DEFINICIÓN 4.5 Sea ν un sistema neural y $\mathscr{C}_t(\nu)$ la composición de ν en el instante t. Además, llamemos

C_t: $\mathscr{C}_t(\nu) \times \mathscr{C}_t(\nu) \rightarrow [-1, 1]$

a la función tal que $C_t(a, b)$, para $a, b \in \mathscr{C}_t(\nu)$ es la fortaleza (intensidad) de la conexión (acoplamiento, vínculo) desde la neurona *a* hacia la neurona *b* en el instante *t*. Luego, la *conectividad* de ν en *t* está representada por la matriz que forman todos los valores de conexión, vale decir,

$$\mathbb{C}_t = \| C_t(a, b) \| .$$

DEFINICIÓN 4.6 La conectividad es *constante* sii no cambia una vez establecida (o sea, sii $\mathbb{C}_t$ es independiente del tiempo). De lo contrario, es *variable*.

DEFINICIÓN 4.7 Un sistema neuronal es *plástico* (*no comprometido*, *modificable* o *autoorganizable*) sii su conectividad es variable durante la vida del animal. De lo contrario (vale decir, si es constante desde el nacimiento, o desde cierta etapa del desarrollo del animal), el sistema es *comprometido* (*rígido*, *incorporado* o *preprogramado*).

DEFINICIÓN 4.8 Todo sistema neural plástico se llama *psicón*.

Hasta aquí llegamos con nuestras definiciones preliminares. Ahora ya estamos preparados para el primer puñado de axiomas de nuestra teoría de la mente.

1.4. Supuestos básicos

Nuestra primera hipótesis es bastante obvia:

POSTULADO 4.1 Todos los animales que tienen sistema nervioso poseen sistemas neuronales comprometidos y algunos animales también tienen sistemas neuronales plásticos (no comprometidos o autoorganizables).

Al parecer, los gusanos, los insectos y otros animales inferiores sólo poseen sistemas neuronales completamente (o casi completamente) rígidos. En cambio, la corteza plástica del ser humano es la de mayor tamaño del reino animal y constituye una suerte de enorme ejército de reserva preparado para hacer frente a las emergencias, la mayoría de

las cuales jamás ocurre. Por consiguiente, mientras que el repertorio de comportamientos de los animales inferiores está predeterminado (preprogramado), el del ser humano (así como el de otros numerosos vertebrados) puede evolucionar durante la vida del individuo. Más acerca de la plasticidad del comportamiento en la Sección 3.3.

POSTULADO 4.2 Los sistemas neuronales que regulan (controlan) el medio interno, así como todas las biofunciones del animal recién nacido, son comprometidas (incorporadas).

Ejemplo La temperatura y la acidez del fluido intercelular están reguladas, principalmente, por ciertos sistemas neuronales rígidos, al igual que los movimientos respiratorios y de succión del neonato. Pero no son los únicos reguladores involucrados: el sistema endocrino también desempeña un papel importante en el control interno.

POSTULADO 4.3 Los sistemas neuronales plásticos (no comprometidos) de un animal (vale decir, sus psicones) están acoplados y forman un supersistema, a saber, el *supersistema neural plástico* del animal. Símbolo: *P*.

POSTULADO 4.4 Todo animal provisto de psicones (sistemas neuronales plásticos) es capaz de adquirir nuevas biofunciones en el transcurso de sus vidas. (Pero, desde luego el surgimiento de nuevas biofunciones es únicamente un indicador, no una demostración, de la existencia de los sistemas neuronales plásticos).

Por último, formularemos la

DEFINICIÓN 4.9 Llamamos *aprendida* a toda función neural que incluya un psicón (o sistema neural plástico) con una conectividad regular (vale decir, una conectividad constante o que varíe en forma regular).

En otras palabras, suponemos que aprender consiste en la formación de nuevos sistemas neurales, es decir, en el establecimiento de conexiones permanentes entre las neuronas o la facilitación de interconexiones neuronales efímeras (pero repetibles). Algunas de estas conexiones pueden formarse de manera accidental (aleatoria); si resultan valiosas, tienen la oportunidad de establecerse o de volver a ocurrir. Estas ideas se remontan a Ramón y Cajal y a Hebb: propusieron la hipótesis de uso-desuso, la cual en tiempos recientes ha sido objeto de intensa experimentación (por ejemplo, Moore, 1976; Rutledge, 1976) y teorización (por ejemplo, Malsburg, 1973; Cowan, 1976).

Procedamos a refinar las ideas anteriores echando mano de los conceptos de función de estado y espacio de estados (Capítulo 1, Sección 2.2), y presentemos el concepto especial de función mental.

2. Los estados cerebrales

2.1. Las funciones cerebrales

Hemos definido las funciones de un sistema como el conjunto de procesos que acontecen en el sistema, vale decir, lo que el sistema hace; y las funciones específicas del sistema son aquellas que ese sistema –y no otra cosa de una clase diferente– puede desempeñar (Capítulo 3, Sección 2.2, Definición 3.8). Así como no hay sistemas sin funciones (procesos), tampoco hay funciones sin un sistema que las realice. Cuando un neurocientífico dice que la «estructura» (sistema neuronal) *Y media* o *se encarga* de la función *X*, quiere decir que *Y* realiza *X* y, más precisamente, que *X* es una de las actividades o procesos específicos de *Y*.

Puesto que se trata de un sistema constituido por varios miles de millones de neuronas, el SNC de los mamíferos participa en una gran variedad de actividades, desde la síntesis de proteínas y el control de las funciones de otros órganos hasta la realización de las funciones superiores, tales como la formación de un mapa del entorno. Aquí no nos ocuparemos de las funciones no específicas o «domésticas» del SNC, salvo para advertir que éstas son aun más intensas que en las demás partes del cuerpo, a juzgar por las tasas de consumo de oxígeno y de recambio de proteínas. Nos centraremos, en cambio, en las funciones específicas del SNC, las cuales se pueden agrupar en dos grandes tipos: control y cognición.

El control puede ser de sistemas internos (por ejemplo, del sistema digestivo), de partes móviles externas (sistema motor) o de la afluencia sensorial. La cognición, por su parte, puede ser de sucesos externos, de la actividad interna –con excepción de la actividad cerebral– o de la propia actividad cerebral, en cuyo caso se llama 'conciencia'. Y sabemos, por el Capítulo 3, que la regulación es inherente a todo biosistema y, ciertamente, a todo sistema bioquímico. Lo que es peculiar de las funciones de control [o regulación] del SNC es que son supremas e integradoras, vale decir, que no se las puede recurrir y que afectan a todo el organismo.

Pero no trataremos aquí de las funciones de control del SNC porque en la actualidad son de escaso interés filosófico. En lugar de ello, nos ocuparemos de sus actividades o funciones cognitivas.

En primer lugar, está la cognición del mundo externo, la cual puede ser directa (perceptiva) o indirecta (intelectual). Nos ocuparemos de la primera en la Sección 3.1, de la segunda en la Sección 4.3. En segundo lugar están las diversas clases de información que el cerebro recibe del resto del cuerpo, integra y procesa. Parte de esa información es bastante específica y está localizada, como sucede en el caso de las imágenes visuales, en tanto que en otros casos, como los de la euforia y la depresión, la información no es específica y está poco localizada. Pero todas estas clases de información están funcionalmente relacionadas con otros sucesos corporales: hay cambios fisiológicos externos al cerebro que les envían señales a las cuales, a su vez, reaccionan. Por último, está la cognición del cerebro de algunos de sus propios estados, vale decir, la autoconciencia. Nos ocuparemos de ella en la Sección 5.1.

A continuación explicaremos la representación del espacio de estados de la actividad del SNC. Consideremos un sistema neuronal arbitrario, sea éste un pequeño circuito neuronal (fijo o itinerante), un subsistema de considerable tamaño del SNC o el cerebro íntegro. Como sucede con todos los demás sistemas, se puede representar ese sistema mediante una función de estado $\mathbb{F} = \langle F_1, F_2,\ldots F_n \rangle$. Si lo que nos interesa no es la localización precisa del sistema y sus componentes, sino sólo sus propiedades globales no espaciales, podemos suponer que $\mathbb{F}$ no es más que una función dependiente del tiempo, cuyos valores son n-tuplas de números reales. Vale decir, podemos establecer que $\mathbb{F}: T \to \mathbb{R}^n$, donde $T \subseteq \mathbb{R}$ y $\mathbb{R}$ es el conjunto de los números reales. (Consideramos que el huésped del sistema nervioso, es decir, el animal en su totalidad, es el marco de referencia).

Cada componente F_i de de la función de estado $\mathbb{F}$ puede descomponerse en una parte constante (o aproximadamente constante) F_i^c y una parte variable F_i^v: véase la Figura 4.2. Obviamente, ambas pueden ser nulas durante el período de interés. Sin embargo, lo importante es que, mientras que el ritmo de cambio de F_i^c en cada instante es cero (o sea, $F_i^c = 0$), el de F_i^v no lo es. Por consiguiente, puede considerarse que F_i^v representa la actividad normal del sistema neuronal en su i-ésimo aspecto. Por este motivo, estipulamos la

DEFINICIÓN 4.10 Sea $\mathbb{F}: T \rightarrow \mathbb{R}^n$ una función de estado de un sistema neural ν y sea $\mathbb{F} = \mathbb{F}^c + \mathbb{F}\upsilon$, donde $\mathbb{F}^c = 0$ (tasa de cambio nula) para todo $t \in T$. Luego,

(i) ν es *activa* en el instante t sii $\mathbb{F}^\upsilon(t) \neq 0$;

(ii) la *intensidad de la actividad* de ν durante el intervalo temporal $\tau \subset T$ es igual a la fracción de componentes de υ activa durante τ;

(iii) el *estado de actividad* de ν en el instante t es $s = \mathbb{F}^\upsilon(t)$;

(iv) el *proceso* –o *función*– (total) en el cual ν participa durante el intervalo temporal $\tau \subset T$ es el conjunto de estados de actividad de ν:

$$\pi(\nu, \tau) = \{\mathbb{F}^\upsilon(t) \,|t \in \tau\}.$$

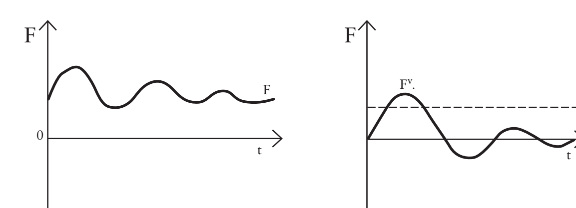


Figura 4.2. Descomposición de una función de estado $\mathbb{F}$ en una parte constante $\mathbb{F}^c$ y una parte variable $\mathbb{F}^\upsilon$.

Mientras que las neuronas particulares pueden pasar más de una vez por prácticamente el mismo estado de actividad, es sumamente improbable que un sistema neural compuesto por un millón de neuronas haga lo mismo. Podemos suponer que en un sistema neural de tamaño medio no hay dos estados de actividad sucesivos idénticos y que, con mayor razón, tampoco los hay en sistemas de mayor tamaño, tales como, por ejemplo, el hipocampo. Dado que identificaremos los estados mentales con algunos de esos estados de actividad, se deduce que ningún suceso mental ocurre más de una vez exactamente del mismo modo.

A continuación presentaremos el concepto de actividad específica de un sistema neural como una aplicación (especificación) del concepto de función específica de un biosistema (Definición 3.8 (ii)):

DEFINICIÓN 4.11 Sea $\pi(\nu, \tau)$ el proceso (o función) total de un sistema neural ν que acontece en un animal b durante el intervalo $\tau \subset T$. La correspondiente *función* (*proceso* o *actividad*) *específica* de ν durante τ será

$$\pi_s(\nu, \tau) = \pi(\nu, \tau) - \bigcup_{\mu < b} \pi(\mu, \tau), \qquad \text{donde} \qquad \mu \neq \nu.$$

Hemos postulado que todas las cosas cambian, espontáneamente en ciertos aspectos, de forma causada en otros (Volumen 3, Postulado 5.11). En particular, las neuronas jamás están en reposo y el SNC humano está activo incluso cuando la estimulación sensorial ha cesado. Por consiguiente, adoptaremos la hipótesis de que el SNC, y todos los subsistemas neurales del mismo, están en constante actividad, aun en ausencia de estímulos externos. Para formular este principio, consideremos *m* neuronas que hacen sinapsis con una neurona dada *i*. Podemos suponer que la tasa de cambio del estado de actividad de *i* se compone de una parte autónoma (espontánea) y de otra que es proporcional a las señales de las fibras aferentes:

$$\dot{F}_i^\nu(t) = A_i(t) + \sum_{j=1}^{m} C_t(j, i)\, F_j^\nu(t),$$

donde $C_t(j, i)$ es la fortaleza de la conexión $j - i$ (cf. Definición 4.5). Este sistema de ecuaciones está incompleto. Se lo debe complementar con un sistema de ecuaciones para las tasas de cambio de las conectividades. Una difundida hipótesis es que

$$C_t(i, j) = c_{ij} \cdot \exp(-|x|/b_{ij}),$$

donde los c_{ij} y los b_{ij} son números reales y $|x|$ es la distancia entre las unidades *i* y *j*. Otro candidato interesante parecería ser

$$\dot{C}_t(i, j) = c_{ij}\, F_i^\nu.$$

(Para algunos modelos matemáticos de los sistemas corticales dinámicos, véase Marr, 1970; Wilson y Cowan, 1973; y Nass y Cooper, 1975).

Con todo, aquí sólo nos interesa el principio general:

POSTULADO 4.5 Para todo sistema neural ν de un animal, el estado de actividad instantáneo de ν se descompone de forma aditiva en dos funciones: $\mathbb{F}^\nu = \mathbb{A} + \mathbb{E}$, donde $\mathbb{A}$ no es igual a cero para todo $t \in T$, en tanto que $\mathbb{E}$ depende de las acciones de otros subsistemas del animal sobre ν.

DEFINICIÓN 4.12 Sea $\mathbb{F}^{\nu} = \mathbb{A} + \mathbb{E}$ la parte activa de la función de estado de un sistema neural ν. Luego, $\mathbb{A}(t)$ es el *estado de actividad espontánea* de ν en el instante t y $\mathbb{E}(t)$ es el *estado de actividad inducida* (o *estimulada*) de ν en t.

Una vez que conocemos, o simulamos conocer, cómo funciona un sistema neural, podemos intentar averiguar cómo se combinan dos o más sistemas neurales para formar un supersistema. Supongamos que ν_1 y ν_2 son dos sistemas neurales de un animal dado, ambos con el mismo número m de neuronas. Llamemos $\mathbb{F}_1^{\nu}$ y $\mathbb{F}_2^{\nu}$ a sus respectivas funciones de estado activas. Supongamos, además, que las neuronas de ν_1 hacen sinapsis con las de ν_2, de suerte tal que ν_2 tiene una actividad estimulada, o inducida, además de su actividad espontánea. El supuesto más simple es, desde luego, que la actividad inducida $\mathbb{E}_2$ de ν_2 depende linealmente de F_j^{ν}, vale decir, que $\mathbb{E}_2 = C \cdot \mathbb{F}_1^{\nu}$, donde C es una matriz $m \times m$ que representa la conectividad intersistémica. Esta conectividad depende del tiempo. Suponemos que se fortalece con el uso y se debilita con la falta del mismo.

Si ν_1 no activa ν_2, el valor de C habrá disminuido, después de un intervalo temporal, a $C(t+1) = a\, C(t)$, donde $0 < a < 1$. Después de k intervalos temporales, $C(t+k) = a^k\, C(t)$, la cual se acerca a cero con el transcurso del tiempo. Si, en cambio, ν_1 activa ν_2, la conectividad se fortalecerá en proporción a la actividad simultánea de los dos sistemas neurales. Es decir, el incremento de conectividad será $\Delta C(t) = b\mathbb{F}_1^{\nu} \cdot \mathbb{F}_2^{\nu}$, donde b es una matriz $m \times m$ de números reales, algunos positivos, otros negativos. En consecuencia, de forma general, el valor de la conectividad en el instante t será

$$C(t) = a\, C(t-1) + b\, \mathbb{F}_1^{\nu}(t) \cdot \mathbb{F}_2^{\nu}(t),$$

de modo tal que el estado de actividad de ν_2 en t estará representado por

$$\mathbb{F}_2^{\nu}(t) = \mathbb{A}_2(t) + a\, C(t-1) \cdot \mathbb{F}_1^{\nu}(t) + b(\mathbb{F}_1^{\nu}(t) \cdot \mathbb{F}_2^{\nu}(t) \cdot \mathbb{F}_1^{\nu}(t)).$$

Esto es pura especulación, aunque se trata de una conjetura congruente con las tendencias actuales en la modelización neural. Su interés filosófico radica en que prueba que es posible interpretar los estados y sucesos mentales como estados y sucesos de sistemas neurales y, por ende, tratarlos de forma matemática. Más sobre esto a continuación.

2.2. Los estados y procesos mentales

Todo hecho que, en forma introspectiva, se experimenta como mental es idéntico a cierta actividad cerebral: ésta es, en pocas palabras, la hipótesis neurobiológica o materialista de la mente. Por ejemplo, la visión consiste en la actividad de los sistemas neurales del sistema visual; el aprendizaje es la formación de nuevas conexiones neurales y la memoria es la activación de ciertas conexiones neurales.

Toda actividad mental es una actividad del cerebro, pero la inversa es falsa. Por ejemplo, ciertas actividades del componente cortical del sistema auditivo son mentales, aquellas de los componentes comprometidos o rígidos (por ejemplo, el tímpano y la cóclea) no son mentales. Únicamente los sistemas neurales plásticos son capaces de aprender y son el «asiento» o «correlato neural» de lo mental. De forma más precisa, supondremos que lo mental es la función específica de ciertos sistemas neuronales plásticos. Nuestro supuesto adquiere la forma de la

DEFINICIÓN 4.13 Sea b un animal provisto de un sistema neural plástico P. Luego

(i) b experimenta un *proceso mental* (o realiza una función mental) durante el intervalo temporal τ sii P tiene un subsistema ν tal que ν realiza un proceso específico durante τ;

(ii) todo estado (o etapa) de un proceso mental de b es un *estado mental* de b.

Por ejemplo, los actos voluntarios son, presuntamente, actividades de módulos neuronales situados en el prosencéfalo. En cambio, el hambre, la sed, el miedo, la ira y el impulso sexual son procesos que tienen lugar en sistemas subcorticales (principalmente hipotalámicos y límbicos), por lo cual no son mentales, según nuestra definición. Lo que sí es un proceso mental es la conciencia de cualquiera de esos estados, la cual es un proceso de cierto subsistema de P.

Las que siguen son consecuencias directas de las cuatro definiciones anteriores:

COROLARIO 4.1 Todos los animales provistos de sistemas neurales plásticos, y sólo ellos, son capaces de estar en estados mentales (o de experimentar procesos mentales).

COROLARIO 4.2 Todas las afecciones mentales son afecciones neurales.

En consecuencia, la división entre la neurología y la psiquiatría propuesta por el dualismo psicofísico no es razonable.

COROLARIO 4.3 Las funciones (los procesos) mentales cesan con la muerte de los correspondientes sistemas neurales.

Ejemplos Las lesiones cerebrales, los accidentes cerebrovasculares y, por supuesto, la muerte producen el cese de las funciones mentales que normalmente desempeñan los sistemas neurales afectados. El dualismo no explica esta «correlación».

COROLARIO 4.4 Las funciones (procesos) mentales no pueden transferirse directamente (es decir, sin la intervención de un canal físico) de un cerebro a otro.

Por consiguiente, la percepción extrasensorial está fuera de toda discusión. (El mago Henry Morgan, de Montreal, propone que le demos un nuevo nombre: 'decepción extrasensorial').

Y llegamos al concepto central de la filosofía de la mente:

DEFINICIÓN 4.14 Sea P el supersistema plástico (no comprometido) de un animal b de la especie K. Luego,

(i) la *mente* de b durante el período τ es la unión de todos los procesos (funciones) mentales en los que intervienen los componentes de P durante τ:

$$m(b, \tau) = \bigcup_{x < P} \pi_s(x, \tau);$$

la *mente-K*, o *mente de la especie K*, durante el período τ, es la unión de las mentes de sus miembros durante τ:

$$M(K, \tau) = \bigcup_{x \in K} m(x, \tau).$$

Dado que los miembros del conjunto llamado 'mente' son funciones (procesos) cerebrales, no tiene sentido decir que el cerebro es la «base» física de la mente. Y puesto que la mente humana no es otra cosa que la unión de todas las mentes humanas individuales, resulta absurdo

hablar de la mente colectiva de la humanidad, como si ésta fuera una entidad o, incluso, un sistema funcional. En cambio, la mente de un animal individual sí que posee unidad funcional: se trata de un sistema funcional (Definición 1.9 de la Sección 1.7, Capítulo 1), ya que todos sus procesos (funciones) están legalmente relacionados con al menos otro de sus procesos (funciones). La «base neural» de la unidad de la mente, acerca de la cual han insistido numerosos filósofos, es ésta: en virtud del Postulado 4.3, los componentes del supersistema neural plástico P, en lugar de estar desacoplados, forman un sistema. De ello se deduce el

COROLARIO 4.5 Las funciones (procesos) mentales del supersistema neural plástico de un animal están acopladas unas con otras, vale decir, forman un sistema funcional. (En pocas palabras, para todo animal b y todo período τ de su existencia, si $m(b, \tau)$ no es nula es un sistema funcional).

En consecuencia, cuando un neurocirujano corta en dos el cerebro de un primate viviente, divide en dos el sistema plástico y, con ello, también divide la mente del animal. (Véase el Corolario 4.7).

Nuestra última convención para esta sección es la

DEFINICIÓN 4.15 Sea x un objeto y b un animal provisto de un sistema neural plástico. Luego,

(i) *x está en la mente* de b sii x es un estado o un proceso mental de b (vale decir, si b posee un sistema neural plástico involucrado en un proceso específico que contiene a x como miembro o como subconjunto);

(ii) *x está en la mente* (o *es mental*) sii existe al menos un animal y, tal que x está en la mente de y.

Comentario 1 Un estado mental, tal como el de un dolor persistente o el de percibir una cosa estacionaria, puede ser aproximadamente constante. Sin embargo, todo estado de ese tipo es un estado de la actividad de cierto sistema neural: sin esa actividad, no hay actividad mental. En otras palabras, los estados mentales se parecen más a los estados de movimiento que a estados estáticos, tales como los de un gas en un recipiente rígido. *Comentario 2* Hemos afirmado que los estados mentales son estados (o, mejor dicho, procesos) neurales, y no que cada estado neural posee un «correlato» mental. Si bien diferentes estados mentales son diferentes estados (o, mejor dicho, procesos) neurales, la inversa no es verdadera: un estado mental dado puede ser un proceso que tiene

lugar ora en un sistema neural itinerante, ora en otro. Sin duda, habrá diferencias: por lo que sabemos, hasta cuando realizamos sumas de rutina podemos involucrar, cada vez, un sistema neural itinerante distinto, pero no nos percatamos introspectivamente de la diferencia (Bindra, 1976). (O sea, si llamamos N al conjunto de estados neurales que son mentales y M al conjunto de estados mentales que podemos distinguir de forma introspectiva, $M = N/\sim$, donde $\sim$ es la relación de equivalencia introspectiva). *Comentario 3* No hemos caracterizado los estados mentales independientemente de los estados cerebrales, como quisieran los dualistas. Nuestras razones son las siguientes: (*a*) los predicados mentalistas, tales como «ve rojo» y «piensa mucho», aunque indispensables, son bastos y corrientes, en lugar de precisos y científicos, (*b*) la principal motivación del enfoque neurofisiológico de la mente es alejarse del enfoque de conocimiento común y hacer que la mente sea accesible a la ciencia; (*c*) si los sucesos mentales se caracterizan en forma independiente de los sucesos cerebrales, la teoría de la identidad se vuelve inútil o falsa (Brandt y Kim, 1967). *Comentario 4* La afirmación dualista de que la mente no es física porque no se la puede describir mediante conceptos físicos, tales como los de presión y conductividad, pierde de vista el objetivo. En primer lugar, si bien los sucesos como las pesadillas y la sensación de un sabor amargo no pueden describirse en términos exclusivamente físicos, sí son describibles, por lo menos en principio, en términos neurofisiológicos. En segundo lugar, en la vida cotidiana puede que nunca nos preocupemos de describir los estados mentales desde la perspectiva neural, del mismo modo que no nos interesamos por describir sucesos físicos corrientes, tales como un choque de automóviles o la incandescencia de una lámpara eléctrica, con la parafernalia de la teoría física. Hacerlo no nos compensaría; nos basta con saber que, si lo necesitamos, esos sucesos o algunas de sus características pueden explicarse de manera científica. *Comentario 5* A pesar de la opinión de Armstrong (1968), la mente y el cerebro no son idénticos: no hay más identidad entre el cerebro y la mente que la que pueda haber entre los pulmones y la respiración. En nuestra versión de la llamada teoría de la identidad, el conjunto de estados mentales es un subconjunto de los estados del sistema neural plástico del animal: véase la Figura 4.3.

2.3. Las interacciones psicosomáticas

La variedad interaccionista del dualismo, desde Descartes (1649) hasta Popper y Eccles (1977), sostiene que la materia y la mente, si bien heterogéneas y separadas, actúan la una sobre la otra. Esta doctrina resulta insostenible, aunque sólo fuese porque las interacciones sólo están bien definidas para las cosas concretas (Volumen 3, Capítulo 5, Definición 5.30). El discurso sobre la interacción mente-cuerpo es tan erróneo como si habláramos de las interacciones forma-cuerpo, propiedad-cosa, composición-sistema y comportamiento-animal. Con todo, sí tiene sentido hablar de interacciones entre lo mental y lo corporal, a condición de que esta expresión se utilice como abreviación de «interacciones entre sistemas neurales plásticos (no comprometidos), por un lado, y los sistemas neurales comprometidos o las partes del cuerpo que no forman parte del SNC, por el otro». *Ejemplo* Las interacciones entre las regiones corticales y subcorticales del SNC, entre las áreas sensoriales y motrices, entre los sistemas neurales que ejecutan la ideación y los receptores externos, entre la corteza visual y la hipófisis, etc.

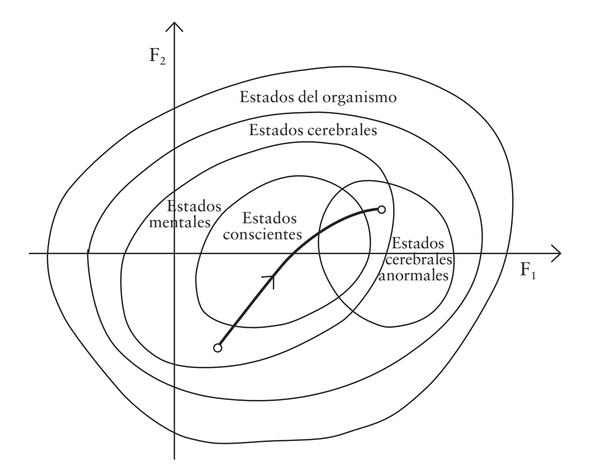


Figura 4.3. Proyección del espacio de estados de un ser humano. Ambos ejes representan propiedades neurofisiológicas; uno de ellos es idéntico a una propiedad psicológica. El arco de la curva representa un proceso mental, tal como componer una melodía, el cual es sólo parcialmente consciente. Una parte del mismo es anormal, por ejemplo, se compone de ilusiones auditivas.

Paradójicamente, mientras que el dualista no tiene derecho a afirmar que los sucesos mentales influyen en los sucesos corporales no mentales (porque no tiene una idea clara de esa influencia), el monista sí que tiene derecho a sostener esta opinión. En efecto, puesto que, para él, los sucesos mentales son sucesos neurales de cierta clase, los primeros pueden influir y hasta causar otros sucesos en cualquier subsistema del mismo cuerpo, en virtud de la acción integradora del SNC. En resumen, dado que los sucesos mentales son sucesos neurales y que la relación causal está definida para pares de sucesos que acontecen en cosas concretas (Volumen 3, Capítulo 6, Definición 6.23), tenemos el

COROLARIO 4.6 Los sucesos mentales pueden causar sucesos no mentales en el mismo cuerpo y viceversa.

En consecuencia, las perturbaciones de las biofunciones no mentales (metabólicas, por ejemplo) pueden influenciar los estados mentales y, recíprocamente, los sucesos mentales, tales como los actos voluntarios, pueden influir en los estados corporales no mentales. De esto, precisamente, se tratan la neurología, la neuroquímica, la psiquiatría, la educación y la publicidad. *Ejemplo 1* Los yoguis aprenden a regular sus latidos, su peristaltismo intestinal y hasta la proporción de consumo de oxígeno (cf. Miller, 1969). *Ejemplo 2* Un golpe en la cabeza puede hacernos «perder» la memoria y borrar todo recuerdo de los sucesos inmediatamente previos al accidente. *Ejemplo 3* Mediante la implantación de electrodos en lugares específicos y el envío de corrientes eléctricas a través de ellos, el neurofisiólogo puede controlar algunos estados mentales y, a través de ellos, provocar o inhibir comportamientos tales como la furia (cf. Delgado, 1969).

La más drástica y reveladora de todas las intervenciones quirúrgicas es, desde luego, la sección del puente que une los dos hemisferios cerebrales, o cuerpo calloso (Sperry, 1964, 1966, 1977; Gazzaniga, 1967; Bogen, 1969). Tal como pronosticó Fechner en 1860, el paciente con el cerebro dividido se comporta, en numerosas circunstancias, como si tuviera dos estados de ánimo. Por ejemplo, mientras que su hemisferio izquierdo puede desear leer, el hemisferio derecho puede querer dar un paseo y, por consiguiente, surge un conflicto en el interior de un único cráneo. Esto no resulta sorprendente dentro de nuestro marco conceptual: en efecto, según el Postulado 4.3 y el Corolario 4.4 hay una única

mente siempre que haya un único supersistema plástico. Pero si se corta este último en dos, surgen dos sistemas plásticos, cada uno con su propia mente o sistema de funciones mentales:

COROLARIO 4.7 Sea *b* un animal cuyo sistema nervioso plástico está divido en dos partes separadas, *I* y *D*. Luego, la mente de *b* durante un período temporal cualquiera τ posterior a la separación, se divide en dos sistemas funcionales distintos:

$$m(b, \tau) = m_I(b, \tau) \cup m_D(b, \tau), \quad \text{donde} \quad m_I(b, \tau) \cap m_D(b, \tau) = \emptyset.$$

Por consiguiente, pese a lo afirmado por Puccetti (1977), los resultados de una comisurotomía no confirman el dualismo. Por el contrario, prueban en forma concluyente que no existe ninguna mente inmaterial que mantenga unidos los hemisferios cerebrales.

El dualismo sólo puede salvarse recurriendo a la intervención divina en el momento en que se secciona el cuerpo calloso. Dios tendría que reemplazar el alma original por dos almas nuevas e independientes, cada una de las cuales debería recordar algo de la historia pasada del alma original. Parece una solución fácil, pero no lo es, porque plantea el serio problema teológico de cuál de las tres almas merece la salvación –en caso de que alguna la mereciese– y de qué hacer, cuando llegue el día de la resurrección, con tres almas y sólo un cuerpo. Aun suponiendo que esa dificultad teológica pudiese resolverse, el dualista se encuentra en una situación incómoda. Si niega que el cerebro dividido del paciente tiene dos mentes, niega la experiencia, y si admite que una entidad física, tal como el bisturí del cirujano, puede cortar la mente en dos, se contradice (Bunge y Llinás, 1978).

La manipulación química de la mente, aunque menos espectacular que el caso anterior, no constituye un reto menos palmario para el dualismo. Todas las sustancias químicas que actúan sobre los estados mentales, desde el té hasta la cocaína, lo hacen modificando, de un modo u otro, el metabolismo del SNC. Algunas, por ejemplo, cambian las propiedades de la membrana de las neuronas, otras intervienen en ciertas reacciones bioquímicas. Así pues, mediante la modificación de la conducción de la membrana neural tal sustancia produce amnesia y tal otra facilita la memoria; y a través del bloqueo de la síntesis de cierto neurotransmisor, tal droga produce esquizofrenia y tal otra la cura.

(Para una lista de clases de modificaciones deliberadas del cerebro y la conducta, véase Omenn y Motulsky, 1972).

Por último, la manipulación puramente comportamental o psicológica de la mente no es menos física, puesto que la afluencia sensorial y el producto comportamental controlado por el maestro (el sacerdote, el propagandista o el psiquiatra) modula la conectividad neural y refuerza ciertas conexiones a la vez que inhibe otras. En resumidas cuentas, es posible controlar lo mental, y de hecho se lo controla de maneras diversas, precisamente porque no es inmaterial: si lo fuera, sería inmune a todo intento de manipulación.

Lo que vale para el control físico de la mente, también vale, cambiando lo que haya que cambiar, para el control mental del cuerpo, tan a menudo citado como prueba de la superioridad del Espíritu sobre la Materia. Pensemos en tres conocidos fenómenos: el hambre, el enfado y el yoga. El proceso que incluye el sentimiento de hambre es, habitualmente, el que sigue. Los sensores del tracto digestivo envían señales al hipotálamo que, a su vez, alerta a la corteza. La corteza motriz y el cerebelo controlan los músculos que intervienen en la búsqueda y obtención del alimento, así como en el comer. El dualista cree que puede darse el lujo de ignorar todos estos vínculos: descarta los procesos cuyo resultado es que la corteza desee que el cuerpo coma y habla de la acción directa de la mente sobre los músculos. Su descripción del hecho es demasiado simple y acientífica. Decir que *X* comió porque *quería* comer o tenía la *intención* de comer no es otra cosa que redescribir una circunstancia corriente desde el punto de vista del lenguaje corriente; no ofrece ninguna explicación del proceso. Y, con todo, estas descripciones están tan difundidas entre los filósofos del lenguaje ordinario (por ejemplo, Alston, 1974) como lo estaba, entre los etólogos de hace cincuenta años, la explicación de la conducta en términos de instintos.

Pasemos al enfado. El dualista se contenta con «explicaciones» como ésta: «Lo pateó porque sus palabras la enfadaron». En cambio, el psicólogo fisiológico analiza esta explicación de conocimiento común desde la perspectiva de una cadena causal de sucesos corporales: Audición de una verbalización → Activación de psicones en el prosencéfalo y activación de las adrenales → Acción del prosencéfalo y de las adrenales sobre el centro motor → Movimiento de la extremidad. Asimismo, cuando se lo coloca ante ejercicios de yoga y técnicas de biorretroalimentación para mover objetos sin la intervención de los músculos, el psicólogo fisiológico llega

a la conclusión de que el sistema nervioso autónomo no es tan autónomo como solía pensarse, sino que es posible someterlo, por lo menos parcialmente, al control de los sistemas corticales. No hay, ni puede haber, pruebas de la acción de una mente inmaterial sobre el cuerpo, porque la ciencia no tiene acceso a lo fantasmal. Epicuro lo supo hace veintidós siglos.

2.4. La localización de la mente

Si la mente es inmaterial, entonces es absurdo preguntar dónde está. Las pruebas prima facie de que la mente no tiene localización espacial son de esta clase: cuando alguien piensa en algo no siente que ese pensamiento esté localizado en ningún sitio. Tanto es así que, en el pasado, se suponía que el corazón o el hígado eran el «asiento» de la mente. Sin embargo, y siempre que permanezcamos en el ámbito del conocimiento ordinario, no podemos evitar citar pruebas a favor de la tesis de que la mente es coextensiva con el cuerpo: por ejemplo, cuando alguien se hiere un pie, se siente el dolor allí, no en el cerebro. Por tanto, la experiencia corriente es ambigua: apoya ora la tesis de que la mente no está localizada, ora la tesis de que la mente puede vagar por todo el cuerpo. Esto sugiere que la tesis de la no espacialidad de la mente es confusa, así como que las pruebas que provienen de la introspección resultan insuficientes o no son pertinentes. Deberíamos analizar ambos extremos.

La tesis de la no espacialidad de lo mental contiene dos hipótesis diferentes. Una es que los sucesos mentales son *inextensos*, la otra es que no ocurren en *ningún lugar*, salvo, desde luego, «en» la mente, la cual es pretendidamente inmaterial y, por ende, inextensa. La segunda hipótesis implica la primera, pero no a la inversa. En efecto, los sucesos mentales podrían ser inextensos y, pese a ello, acontecer en algún lugar, por ejemplo, en el cerebro. Asimismo, un suceso físico instantáneo ocurre en cierto instante. En nuestra ontología no hay sucesos en sí, sino únicamente sucesos de alguna cosa (Volumen 3, Capítulo 5). De ahí que la pregunta acerca del espacio «ocupado» por un suceso sea el problema de la extensión de una cosa cambiante. Por consiguiente, no es la *descarga* de una neurona sino la *neurona que realiza la descarga* la que es espacialmente extensa.

Los sucesos o acontecimientos tienen lugar allí donde las cosas «acontecientes» (cambiantes) puedan estar (Volumen 3, Capítulo 6,

Sección 4.2). En particular, los sucesos mentales acontecen en un sistema neural plástico. Por tanto, en principio y a menudo en la práctica, el neurofisiólogo puede localizar un proceso de pensamiento, por ejemplo, provocándolo mediante la estimulación eléctrica (Penfield y Rasmussen, 1950). De ahí que la afirmación de los filósofos del lenguaje ordinario de que «resulta completamente absurdo» hablar acerca de estados y sucesos mentales localizados en alguna parte del cuerpo haya sido refutada experimentalmente. Los sucesos mentales están tan localizados como sus respectivos sistemas neuronales plásticos. Si éstos poseen una localización fija, también la tienen los sucesos mentales en los que intervienen. Y si el caso es que el sistema neural en cuestión es itinerante, el propio suceso mental será itinerante, tanto como lo es una onda luminosa. En resumen, los sucesos mentales acontecen en el cerebro. Sin embargo, la mente, concebida como el conjunto de todos los sucesos mentales (Definición 4.14), no está en ningún lugar.

¿Y qué sucede con el dolor de una extremidad, en particular, el de un miembro que ha sido amputado (miembro fantasma)? La respuesta breve es que, al igual que vemos las estrellas en el firmamento, no en nuestro cerebro, localizamos los dolores en diferentes partes del cuerpo y, en ocasiones, esas localizaciones son erróneas. La respuesta extensa es que la corteza cerebral del ser humano adulto posee un mapa de todo el cuerpo (la representación somatotópica). Allí es donde se descodifican y se localizan las señales provenientes de las diversas partes del cuerpo. Si provienen del muñón de un miembro amputado, el paciente puede sentirlo como si se originara en la parte faltante, porque desde su niñez ha formado un mapa relativamente inalterable. (Hay explicaciones neurofisiológicas alternativas de estas experiencias).

En resumidas cuentas, los procesos mentales están localizados allí donde se localice el correspondiente psicón; asimismo, acontecen en el tiempo y les toma algo de tiempo acontecer. Esta generalización de la neurofisiología contemporánea –prefigurada por la escuela hipocrática– no sorprende en absoluto al materialista, para quien la *res cogitans* es una *res extensa*, a saber, el cerebro.

¿Y qué sucede con las ideas? ¿También están en el espaciotiempo? La respuesta a esta pregunta ambigua depende de cómo se interprete 'idea'. Si entendemos que las ideas son procesos de ideación, entonces las ideas *están* en el cerebro que las piensa, sólo ahí y durante el tiempo en que son pensadas. En cambio, el llamado producto de uno cualquiera

de esos procesos, vale decir, la idea en sí, no está en ningún lugar del espaciotiempo, porque no existe de forma independiente: sólo simulamos que es así. Por ejemplo, si bien pensar el número 3 es un proceso cerebral y, por consiguiente, un proceso localizado en el espaciotiempo, el número 3 no está en ningún lugar, porque se trata de una ficción que existe por convención o decreto, y esta simulación no incluye la propiedad de espaciotemporalidad. Lo que vale para el número 3 vale también para todas las demás ideas: concepto, proposición o teoría. En todos los casos abstraemos las propiedades neurofisiológicas del proceso concreto de ideación y obtenemos un constructo que, por convención, sólo posee propiedades conceptuales o ideales. (Cf. Volumen 1, Capítulo 1).

Para resumir: mientras que lo mental tiene lugar en una cabeza, las ideas en sí, puesto que no tienen ser independiente, no están en ningún lugar.

2.5. Los predicados mentalistas

A primera vista, la objeción más temible para el monismo es ésta: «Los materialistas afirman que todos los sucesos mentales son sucesos cerebrales, pero no puede ofrecer una descripción, por no hablar de una definición, de un suceso mental sin ayuda de conceptos mentales como, por ejemplo, los de yo, intimidad y acceso inmediato. Por consiguiente, ni siquiera pueden afirmar su tesis de la identidad mente-cerebro. En otras palabras, los materialistas no pueden afirmar coherentemente la identidad de los predicados fenoménicos y físicos porque rehúsan tomarse los primeros en serio».

En rigor de verdad, la anterior no es una objeción dirigida específicamente a la tesis de identidad psiconeural, sino una crítica que puede hacérsele a la totalidad de la ciencia, concebida como una empresa cognoscitiva que supera la descripción de apariencias del lenguaje corriente. Nuestra respuesta es la que sigue:

(i) La ciencia se propone dar cuenta de la realidad que hay detrás de las apariencias, por lo que o bien no utiliza predicados fenoménicos o bien, si lo hace, los considera derivados, no básicos. Sin duda, los fenómenos, especialmente los fenómenos mentales, son experiencialmente inmediatos, pero no son ni ontológica ni científicamente primarios: se trata de algo que debe ser explicado.

(ii) Las apariencias (fenómenos) pueden explicarse mediante la psicología, al menos en principio, en términos exclusivamente no fenoménicos. Por ejemplo, las diversas ilusiones ópticas pueden explicarse o bien como resultado de una información incompleta o deficiente, o bien como consecuencia de la fatiga de ciertas neuronas o la conexión defectuosa de otras.

(iii) Una formulación rigurosa de la tesis monista no debe utilizar predicados fenoménicos corrientes ni predicados mentalistas, ni expresiones vagas, tales como 'correlación mental-neural'. (En todo caso, la nuestra no lo hace). La tesis de la identidad consiste en que todos los procesos mentales son procesos cerebrales, no que cada oración mentalista es idéntica a una oración neurofisiológica: la identidad es ontológica, no lingüística. (Lo que realmente importa ha sido oscurecido por la versión no materialista de la teoría de la identidad defendida por Schlick, 1925, y Feigl, 1958).

En otras palabras, no debemos exigir a la ciencia que descienda al nivel del sentido común, sino que, al contrario, debemos esforzarnos por elevar el conocimiento común al nivel de la ciencia. Después de todo, de eso se trata cuando compramos cereales para el desayuno y, en lugar de ceder al influjo de las publicidades acerca de que «X aumenta su vitalidad» prestamos atención al contenido de proteínas, vitaminas y calorías de X; o cuando deseamos comprar un automóvil y, en lugar de contentarnos con la aseveración de que «X es puro brío», preguntamos por la aceleración de X. Deberíamos conducirnos de manera semejante en relación con los predicados mentalistas. Más precisamente, deberíamos adoptar la

REGLA 4.1 Siempre que sea posible, prescíndase de los predicados mentalistas: o bien se los reemplaza por predicados neurofisiológicos, o bien se los define o se los deduce con ayuda de éstos.

Ejemplo de eliminación «La idea de una mente inmaterial que controla el cuerpo es, ni más ni menos, vitalismo; en la ciencia no hay lugar para ella» (Hebb, 1974). *Ejemplo de reducción* El grado de introversión de una persona es igual a la actividad del área septal frontomedial de su sistema hipocámpico (Gray, 1972a).

La Regla 4.1 sugiere una de las siguientes estrategias con respecto a los predicados mentalistas: su eliminación, o su definición o deducción a partir de conceptos neurofisiológicos. La segunda de ellas, o sea, la

definición (o identificación), ha sido elogiada por los partidarios de la identidad (por ejemplo, Smart, 1959). Vale decir, han propuesto que, para todo predicado mentalista *M* existe un predicado neurofisiológico *N*, tal que *M* = *N*, donde = es la relación de identidad corriente (o estricta). Los filósofos del lenguaje corriente han afirmado que esto no puede ser así, porque «es absurdo» (Malcolm, 1964). La respuesta obvia es que, para ellos, no hay ni una sola hipótesis científica que no lo sea, puesto que insisten en mantenerse dentro de los límites del lenguaje corriente y, por consiguiente, del conocimiento común.

Otra objeción a la teoría de la identidad, relacionada con la anterior y elogiada por Popper, quien la consideró concluyente (Popper y Eccles, 1977), es la que sigue (Kripke, 1971). Si hemos de tomarnos la identidad tan seriamente como en «El calor es el movimiento de las moléculas», entonces debe ser una identidad necesaria, en el sentido de que debe ser válida en todos los mundos posibles (independientemente de qué puedan ser tales mundos). Sin embargo, esto no es posible, porque (para Kripke) «parece obviamente posible» que *M* (por ejemplo, el dolor) exista sin el correspondiente estado cerebral *N*, o que éste pueda existir sin ser sentido como dolor, por lo cual la identidad es contingente y, en consecuencia, endeble). Réplica: (*a*) los científicos y los filósofos que aprecian la ciencia no derrochan su tiempo especulando acerca de mundos (lógicamente) posibles: desean explorar el mundo real (Bunge, 1977a); (*b*) la diferencia entre identidad necesaria (estricta) e identidad contingente no se presenta ni en la lógica tradicional ni en la ciencia. En resumen, la objeción sofista al materialismo no se sostiene.

Sin duda, nuestra Regla 4.1 no es un resumen del estado de la cuestión, sino más bien un mandato programático; vale decir, una exhortación que puede orientar la investigación. Como tal, necesita ser confirmada. Y deberíamos descartarla (o, simplemente, olvidarla) si la encontráramos estéril. Pero, lejos de ser estéril, subyace a un gran número de éxitos de la psicología y la neurociencia contemporáneas.

Adviértase que la Regla 4.1 es la versión *débil* de la tesis reduccionista, no su versión fuerte: defendemos la reducción parcial (definición o deducción) de lo mental a lo neurofisiológico, no la eliminación de sus propiedades emergentes (cf. Bunge, 1977b, 1977c). Por consiguiente, no sostenemos que una rana disfruta de una audición de un cuarteto de Beethoven, ni que lo que siente un ser humano al escuchar esa música no difiere de ningún modo del avistaje de una mosca por una rana. Lo

único que afirmamos es que disfrutar de una pieza de Beethoven es un proceso que tiene lugar en el sistema auditivo humano educado para tener esa experiencia.

La reducibilidad parcial (definibilidad o deducibilidad) de los predicados mentalistas no implica que todas las oraciones del lenguaje corriente que se refieran a lo mental sean traducibles, sin más, a una fórmula compleja (posiblemente muy compleja). Tampoco implica, con mayor razón, que toda oración mentalista sea idéntica a una oración neurofisiológica. Si fuese así, sólo habría diferencias de grado entre las descripciones científicas y las descripciones míticas de lo mental. En pocas palabras: el monismo psiconeural genuino (a diferencia de la «teoría de la identidad») *no* afirma que, dada una oración mentalista cualquiera m, hay una oración neurofisiológica n, tal que $m = n$.

Lo mejor que podemos hacer con las oraciones mentalistas es o bien eliminarlas completamente, o bien intentar limpiarlas, hacerlas más profundas y refinarlas. Por ejemplo, la frase 'El alma sobrevive', que tiene sentido en algunas teologías, no tiene ninguno en nuestro marco conceptual, en el cual no aparece el *alma* y la mente está definida como un conjunto de procesos neurales. (Los conjuntos no están ni vivos ni muertos). Y es posible que las oraciones mentalistas del lenguaje corriente que pueden traducirse al lenguaje de la neurofisiología –por ejemplo, 'Su mente está trabajando' o 'Tengo una imagen consecutiva de color amarillo'– sólo puedan traducirse de manera aproximada. En cuanto a la traducción inversa, de oraciones neurofisiológicas y psicofisiológicas a oraciones (mentalistas) del lenguaje corriente, en la mayoría de los casos es imposible, tal como debería resultar evidente al prestar atención a cualquiera de los modelos matemáticos de los procesos mentales publicados en los últimos años.

En resumidas cuentas, los diferentes lenguajes utilizados para describir los sucesos mentales –en particular, los propios del mentalismo, de la conducta y de la neurofisiología– no son traducibles unos a otros en su integridad. Esto es así porque, salvo excepciones, sus oraciones no expresan las mismas proposiciones. Por ejemplo, 'Ella está feliz', 'Ella sonríe' y 'El centro del placer de ella está activo', aunque son oraciones relacionadas, son muy diferentes. En realidad, aunque tienen el mismo referente (ella), y cada una describe un aspecto del mismo proceso, poseen sentidos diferentes y, por eso mismo, no son equivalentes.

La falta de equivalencia de la mayoría de las proposiciones mentalistas y neurobiológicas no constituye un impedimento para la construcción de puentes que las relacionen. Toda la ciencia psicofísica consiste en un intento de revelar algunos de esos puentes, por ejemplo, la relación entre la intensidad del sonido y la sonoridad percibida. (Las leyes psicofísicas tienen la siguiente forma: «Para todo x, si x es un animal de la especie K, luego: si el estímulo físico p afecta a x, luego, x siente el fenómeno mental m». Estas generalizaciones pueden hacerse más profundas, llegado el caso, si se expresa m en términos neurofisiológicos). También la neurología intenta encontrar puentes entre los estados mentales (y también comportamentales) que informan los pacientes neurológicos en lenguaje fenoménico (por ejemplo, 'Sufro migrañas'), por un lado, y las oraciones que describen la disfunción correspondiente del SNC, por otro. (Las leyes neurológicas tienen la siguiente forma: «Para todo x, si x es humano, luego: si x sufre la afección neurológica n, luego, x siente el fenómeno mental m»).

Y hasta aquí hemos llegado con los conceptos generales y básicos, así como con los supuestos, de nuestra versión de la teoría psicobiológica de lo mental. A continuación examinaremos unas cuantas clases, bastante típicas, de procesos mentales.

3. De la sensación a la valoración

3.1. Detección y percepción

Todas las cosas reaccionan ante los estímulos externos, pero algunas reaccionan de una manera más selectiva que las otras: decimos que los detectan. El concepto general de reacción específica o detección se dilucida en la

DEFINICIÓN 4.16 Un sistema *detecta* cosas o sucesos de cierta clase (o es un *detector* de éstos) si y sólo si reacciona únicamente ante ellos.

Los organismos pluricelulares poseen una variedad de detectores agrupados en sistemas llamados *sistemas selectivos* (o, también, de manera engañosa, *sistemas de reconocimiento*). Por ejemplo, el sistema inmunitario puede detectar una gran variedad de moléculas porque está por detectores (anticuerpos) de diversas clases. Y el SNC puede detectar una inmensa variedad de sucesos internos y externos, aunque de ningún modo todos ellos.

Para un animal, no basta poseer detectores: tiene que ser capaz de hacer algo con respecto a los sucesos que detecta. Esto requiere de la amplificación y transmisión de señales de manera uniforme, de forma tal que cada señal pueda ser «interpretada» sin ambigüedades por el SNC. Esto es lo que hacen los neurosensores o neurorreceptores. Un mamífero tiene una miríada de neurosensores: de movimiento, presión, calor, ritmo de secreción, cambios de acidez, contracción muscular, novedad, etc. El concepto general es éste:

DEFINICIÓN 4.17 Un detector es un *neurosensor* (o *neurorreceptor*) sii o bien es un sistema neural, o bien está acoplado de forma directa a un sistema neural.

Ejemplo Las cortezas visuales del gato y el mono (y, probablemente, también del hombre) contienen ciertas neuronas que están especializadas en detectar las líneas verticales y otras que lo están en detectar las líneas horizontales (Hubel y Wiesel, 1959, 1962). A estas neuronas se les llama *detectores de rasgos*.

En los animales superiores, los neurosensores se presentan en sistemas, por lo cual necesitamos la

DEFINICIÓN 4.18 Un *sistema sensorial* de un animal es un subsistema del sistema nervioso del mismo, que está compuesto por neurosensores y por los sistemas neurales acoplados a éstos.

Los sistemas sensoriales de los vertebrados superiores son sistemas sumamente complejos que no sólo incluyen los órganos sensoriales, sino también porciones de la corteza cerebral. Además, están estrechamente vinculados a otros subsistemas del SNC, especialmente al sistema motor. No se trata sólo de detectores de estímulos ambientales, como es el caso de la termocupla o de la célula fotoeléctrica. En efecto, los sistemas sensoriales están sometidos a la acción constante del SNC a través de las fibras aferentes gamma, de modo tal que su estado no sólo depende de la estimulación externa, sino también del estado (y la historia) del SNC. Esto explica por qué casi nunca percibimos el mismo estímulo de la misma manera. Además, prueba (*a*) que la psicología de estímulo y respuesta es básicamente falsa y (*b*) que todo modelo de la percepción ideado a imitación de los detectores puramente físicos o químicos, tales como la cámara fotográfica, está condenado al fracaso.

A continuación, formulamos la

DEFINICIÓN 4.19 Una *sensación* (*proceso sensorial* o *sentimiento*) es un estado de actividad (función o proceso) específico de un sistema sensorial.

Sentir frío o calor, por ejemplo, estar hambriento o saciado, sentirse cansado o lleno de energías, sentir dolor o placer, son funciones de otros tantos sistemas sensoriales. Por consiguiente, todas las sensaciones (o sentimientos) tienen lugar en el cerebro, aun cuando habitualmente son provocadas fuera del mismo. En consecuencia, las sensaciones pueden ser embotadas o agudizadas mediante la manipulación del cerebro, sea ésta eléctrica, química o comportamental. Si tuviesen lugar en una mente inmaterial, no tendríamos acceso a ellas desde el exterior.

No todo es detección: en los vertebrados, la información sensorial es procesada o «interpretada» por «áreas» sensoriales especiales de la corteza cerebral. En el cerebro de los primates, cada una de esas «áreas» corticales sensoriales puede subdividirse en tres partes: la primaria, la secundaria y la terciaria. Sólo el área cortical sensorial primaria debe considerarse un componente de los sistemas sensoriales correspondientes. Puede presumirse que esa área pierde plasticidad a medida que el animal se desarrolla. En cambio, las áreas sensoriales secundaria y terciaria parecen seguir siendo plásticas durante toda la vida del animal. Las llamaremos sistemas neurales *plásticos* acoplados *directamente* con el sistema sensorial. Supondremos, tal como hace Hebb (1968), que mientras que la sensación es la actividad específica de un sistema sensorial, incluida el área cortical sensorial primaria, la percepción es esta actividad junto con la actividad provocada por el sistema sensorial del sistema neural plástico acoplado directamente con éste. Véase la Figura 4.4.

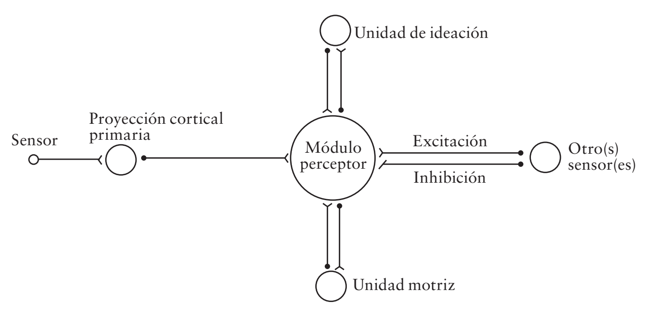


Figura 4.4. Esquema de un sistema perceptor: modificado a partir de Bindra (1976), modificado, a su vez, a partir de Hebb (1949).

Esta figura resume las siguientes características de la percepción humana:

(i) la percepción es llevada a cabo por un sistema neural localizado en una proyección sensorial secundaria de la corteza cerebral;

(ii) el funcionamiento de la unidad perceptora está fuertemente influido por alguna de las unidades motrices, así como por las unidades de ideación y las afluencias de diversas modalidades;

(iii) la unidad perceptora central puede ser activada por otras unidades acopladas a ella (por ejemplo, sueños, alucinaciones, experiencias de miembros fantasmas, imágenes eidéticas);

(iv) la percepción puede guiar el movimiento, así como la ideación.

Resumiremos lo dicho en la

DEFINICIÓN 4.20 (i) Un *percepto* (o *proceso perceptivo*) es una función (actividad o proceso) específica de un sistema sensorial y de los sistemas neurales plásticos acoplados directamente con éste;

(ii) un *sistema perceptivo* es un sistema neural que puede experimentar procesos perceptivos.

Supondremos –tal como hace Bindra (1976)– que, mientras que un sistema sensorial tiene una composición neuronal aproximadamente constante, su correspondiente sistema perceptivo posee una parte variable. Esto explica por qué un estímulo dado puede activar diferentes percepciones (como en los casos de la figura pato-conejo y del cubo de Necker) y también por qué diferentes estímulos pueden dar lugar a la misma percepción (como en el caso de la percepción de la constancia del tamaño de un objeto). Véase la Figura 4.5. En otras palabras, dos perceptos son *equivalentes* sii son suscitados por la misma sensación e involucran al mismo sistema neural plástico.

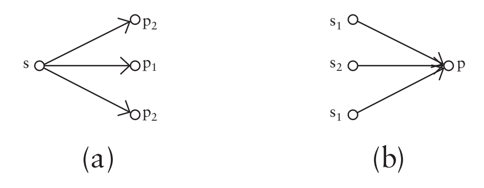


Figura 4.5. Sensación y percepción. (a) La misma sensación suscita diferentes percepciones según el ensamblaje neural plástico que active. (b) Diferentes sensaciones dan lugar a la misma percepción mediante la activación del mismo sistema neural plástico.

Supondremos también que la percepción de un objeto externo es la distorsión que éste causa en la actividad de un sistema perceptivo. De modo más preciso, supondremos el

POSTULADO 4.6 Sea ν el sistema perceptivo de un animal b y llamemos $\pi_S(\nu, \tau) = \{\mathbb{F}^{\nu}(t) \mid t \in \tau\}$ al proceso específico (o función específica) que realiza ν durante el período τ, cuando está en presencia de una cosa x, externa a ν; además llamemos $\pi_S^{o}(\nu, \tau)$ a la función específica de ν durante un período de tiempo igual, cuando x no actúa sobre ν. Luego, b percibe a x como la diferencia simétrica entre los dos procesos. Vale decir, la percepción de x por b durante τ es el proceso

$$p(x, \tau) = \pi_S(\nu, \tau) \, \Delta \pi_S^{o}(\nu, \tau).$$

Este postulado da razón de la naturaleza activa o creativa de la percepción y, con ello, del hecho de que, cuando se encuentra en diferentes estados, el mismo sistema perceptivo percibirá el mismo objeto de maneras diferentes. Esta hipótesis no coincide con la doctrina de la aprehensión directa de los empiristas y los intuicionistas (en particular, con los partidarios de las teorías gestálticas). Pero sí es congruente con la neurofisiología de la percepción actual, en particular porque incorpora la espontaneidad del SNC que la teoría causal de la percepción niega. Los estímulos externos e internos no ponen en movimiento el SNC, sino que modulan o controlan su incesante actividad. En otras palabras, en lugar de causarla, el entorno aumenta o disminuye y, en general, controla o modula, la actividad del SNC.

3.2. El mapeo del cuerpo y el entorno

¿Qué percibimos y cómo lo percibimos? La respuesta del realismo ingenuo es ésta: percibimos las cosas, tal cual son. Pero imagine el lector el universo homogéneo y sin sucesos de Parménides. En éste, un observador no podría percibir nada, porque no habría nada que discriminar de ninguna cosa y porque en ese universo no habría movimiento. El observador sería incapaz de ver, porque sólo pueden ser vistas las cosas contra las que los fotones se reflejan; no oiría nada, porque sólo las cosas en movimiento generan ondas de sonido y tampoco tendría sensacio-

nes táctiles, porque tocar es perturbar y ser perturbado. El observador mismo debe ser mudable, porque la percepción es un proceso que tiene lugar en un animal provisto de sistemas perceptivos.

Por consiguiente, no percibimos cosas sino sucesos, y no todos ellos, sino solamente algunos de los que nos afectan: la luz que se refleja en la superficie del lago e impacta nuestra retina, la llamada del búho que vuela a corta distancia y genera ondas de sonido que ponen en movimiento nuestros tímpanos, la llamarada que lame nuestra mano. Todo lo que percibimos es un suceso o una secuencia de sucesos, y no cualquier suceso, sino uno que se origina en un neurosensor o actúa sobre éste y, en todo caso, pertenece a nuestro propio espacio de sucesos (o conjunto de sucesos que tienen lugar en nosotros). Y nuestras percepciones son, a su vez, sucesos que tienen lugar en la parte plástica de nuestra corteza sensorial. No son sucesos autónomos, sino sucesos que mapean, o representan, sucesos que tienen lugar en otras partes del cuerpo o en nuestro entorno. No cabe duda de que este mapeo es de todo menos simple y fiel, pero de todos modos es un mapeo. Formularemos, por ende, el

POSTULADO 4.7 Sea b un animal provisto de un sistema perceptivo c y llámese $S(b)$ al espacio de estados de b, y $S(c)$ al de c. Además, sea $E(b) \subset S(b) \times S(b)$ el espacio de sucesos del animal y $E(c) \subset S(c) \times S(c)$ su espacio de sucesos perceptivos. Luego, existe un conjunto de funciones inyectivas (uno a uno y no sobreyectivas) del conjunto de sucesos corporales de b al conjunto de sucesos perceptivos de c. Cada mapa, llamado *esquema corporal*, depende de la clase de sucesos corporales, así como de los estados en los cuales está el animal. Vale decir, la forma general de cada mapa corporal, es

$$m: S(b) \times 2^{E(b)} \longrightarrow 2^{E(c)},$$

donde 2^X es la familia de todos los subconjuntos de X.

Comentario 1 Este supuesto no especifica el esquema corporal, ni siquiera afirma cuántos hay. Esas determinaciones son tarea de la psicobiología. *Comentario 2* A primera vista, las experiencias de miembros fantasmas refutan el postulado. Pero no es así, porque los esquemas corporales se aprenden: los niños no tienen experiencias de ese tipo. *Comentario 3* Puede decirse que el animal b en el estado s siente los

sucesos corporales $x \in 2^{E(b)}$ sii b posee un esquema corporal m, tal que $m(s, x) \in 2^{E(c)}$; vale decir, si esos sucesos se proyectan en la corteza c de b.

Los mapas del mundo exterior son semejantes a los esquemas corporales. La única diferencia es que, en este caso, los sucesos corporales son causados por sucesos externos y esos mapas son mucho más numerosos que los esquemas corporales. En realidad, hay un atlas completo del mundo exterior, compuesto por docenas de mapas: uno para las formas, otros para los colores, otros para el movimiento, y así sucesivamente. Nuestro supuesto es el

POSTULADO 4.8 Sea $E(e)$ un conjunto de sucesos que acontecen en el entorno e de un animal b provisto de un sistema perceptivo c, y llamemos $S(b)$ al espacio de estados de b y $S(c)$ al de c. Además, sea $E(b) \subset S(b) \times S(b)$ el espacio de sucesos del animal y $E(c) \subset S(c) \times S(c)$ su espacio de sucesos perceptivos. Luego, existe un conjunto de mapas parciales k que aplica los conjuntos de sucesos externos de $E(e)$ a pares ordenados $\langle$estado de b, conjunto de sucesos corporales que acontecen en $b\rangle$ y otro conjunto de mapas parciales p a conjuntos de sucesos perceptivos. Más aún, los dos conjuntos de mapas son igualmente numerosos y cada mapa k se compone con un mapa p para formar un *mapa del mundo exterior* de b en e, o ε. Vale decir,

$$\varepsilon : 2^{E(e)} \xrightarrow{k} S(b) \times 2^{E(b)} \xrightarrow{p} 2^{E(c)}.$$

DEFINICIÓN 4.21 Sea b un animal con un sistema perceptivo c en el entorno e. Además, llamemos $S(b)$ al espacio de estados de b y $E(e)$ al de e. Luego, cuando está en el estado $s \in S(b)$, *percibe* los sucesos externos en $x \in 2^{E(e)}$ si y sólo si [éstos causan sucesos corporales que, a su vez, se proyectan en la corteza sensorial c, es decir, si] $k(x) = \langle s, y\rangle$, donde $y \in 2^{E(b)}$ y, a su vez, $p(s, y) \in 2^{E(c)}$. De lo contrario, los sucesos de x serían *imperceptibles* para b cuando está en el estado s [vale decir, los sucesos imperceptibles o bien no causan ningún suceso corporal, o bien los causan, pero éstos no son proyectados en el sistema perceptivo].

Comentario 1 Al igual que los esquemas corporales, los mapas del mundo exterior no son correspondencias punto a punto sino, más bien, conjunto a conjunto. *Comentario 2* Hay numerosos mapas del mundo exterior, varios para cada modalidad. Los diversos mapas visuales se integran en uno, que constituye el espacio visual. Asimismo, los mapas

auditivos se integran en el espacio auditivo, y así sucesivamente. *Comentario 3* Los diversos conjuntos de mapas del mundo exterior, uno para cada modalidad, se integran, a su vez, en el atlas del mundo exterior. Esta integración puede explicarse como la activación simultánea de los diferentes sistemas perceptivos. Dicha activación puede conseguirse mediante la afluencia sensorial a uno o más receptores y la activación de otros sistemas perceptivos a través de los sistemas neurales asociados. Por ejemplo, con sólo su percepción háptica puede tenerse la percepción total o transmodal de una mano conocida, porque los receptores táctiles activan a los demás. Esta integración se aprende. *Comentario 4* El organismo no sólo aprende a integrar las actividades de sus diversos sistemas perceptivos: también aprende a percibir en cada modalidad. En particular, los vertebrados jóvenes aprenden a tocar, a oír, a ver y a oler. Aquí también, el punto de vista psicobiológico puede enseñarnos algo que el dualismo no puede. En realidad, desde el punto de vista neurobiológico, aprender a percibir es un proceso de autoorganización de las conexiones sinápticas de la corteza sensorial.

3.3. El comportamiento: definiciones y principios

El conjunto de salidas motrices de un animal, sea global como en la locomoción, sea parcial como en tomar, sonreír, mover los ojos o excretar, se llama comportamiento (o conducta) del mismo. En resumen, formulamos la

DEFINICIÓN 4.22 Para todo animal b,

(i) el *estado comportamental* [o *de comportamiento*] de b en el instante t es el estado de movimiento de b en t;

(ii) el *comportamiento* de b durante el intervalo temporal τ es el conjunto de todos los estados comportamentales de b durante τ.

Cuando se hereda o cuando se aprende y es exitoso, el comportamiento se torna estable o recurrente. En ese caso, con frecuencia se le llama patrón [o pauta] de comportamiento [comportamental, de conducta o conductual]:

DEFINICIÓN 4.23 Un *patrón de comportamiento* es un comportamiento recurrente.

Los animales que pertenecen a diferentes especies pueden hacer cosas diferentes, tales como nadar, volar, excavar o construir nidos, depredar o huir de los depredadores. E incluso cuando hacen la misma «cosa» (es decir, cuando realizan los mismos movimientos) pueden hacerlo de formas o con estilos diferentes. En resumen, hay diferentes clases de comportamiento y toda especie animal está caracterizada por algunas de ellas a la vez que su repertorio excluye ciertas otras. Por consiguiente, necesitamos la

DEFINICIÓN 4.24 Sea *b* un animal de la especie *K* y sea *A* la unión de todas las especies animales. Luego,

(i) el *comportamiento* (*posible*) *de tipo i del animal b* –o, de forma abreviada, $B_i(b)$– es el conjunto de todos los comportamientos (posibles) de *b* asociados a la *i*-ésima biofunción (en particular, la biofunción neural) de *b*;

(ii) el *repertorio comportamental* del animal *b* –o, de forma abreviada, $B(b)$– es la unión de todos los tipos de comportamiento (posibles) de *b*, vale decir,

$$B(b) = \bigcup_{i=1}^{n} B_i(b);$$

(iii) el *comportamiento* (*posible*) *de tipo i de la especie K* –o, de forma abreviada, $B_i(K)$– es la unión de todos los comportamientos (posibles) de los miembros de *K*, es decir,

$$B_i(K) = \bigcup_{x \in K} B_i(x);$$

(iv) el *repertorio comportamental de la especie K*, o $B(K)$, es la unión de todos los tipos (posibles) de comportamiento de *K*:

$$B(K) = \bigcup_{i=1}^{n} B_i(K);$$

(v) el *repertorio comportamental específico de la especie K*, es el repertorio comportamental exclusivo de los miembros de *K*:

$$B_s(K) = B(K) - \bigcup_{X \subset A} B(X), \qquad \text{donde} \qquad X \neq K;$$

(vi) el *comportamiento* [o *conducta*] *animal* es la unión de los repertorios comportamentales de todas las especies animales, vale decir,

$$B = \bigcup_{X \subset A} B(X).$$

(Se entiende que todas las definiciones previas se refieren a una etapa dada del desarrollo del individuo o de la evolución de la especie. A medida que el animal se desarrolla, su repertorio comportamental cambia. Algo parecido sucede con la evolución de la conducta).

Nuestro primer supuesto es que el comportamiento, lejos de ser primario, es derivado:

POSTULADO 4.9 El comportamiento de todo animal provisto de sistema nervioso es controlado («mediado», «regulado») por éste. Es decir, para todo tipo de comportamiento B_i de los animales provistos de sistema nervioso, éste contiene un subsistema neural que regula los movimientos de B_i.

Una consecuencia directa de ello es el

COROLARIO 4.8 A todo cambio de los sistemas neurales (no redundantes) le sigue un cambio comportamental.

Ahora bien, no hay dos sistemas nerviosos idénticos, ni siquiera dos sistemas físicos idénticos en todo sentido. Esta generalización junto con el Postulado 4.9 implican el

TEOREMA 4.1 No existen dos animales que se comporten exactamente del mismo modo [ni siquiera en el caso de que pertenezcan a la misma especie].

El supuesto de que un sistema nervioso puede contener un subsistema plástico (Postulado 4.1), junto con el Postulado 4.9 y la Definición 4.24, implican el

TEOREMA 4.2 El repertorio comportamental de un animal provisto de sistemas neurales plásticos se divide en dos partes: una controlada por la parte comprometida (incorporada) del SN del animal, y el complemento de ésta, vale decir, los comportamientos controlados por los componentes plásticos del SN.

DEFINICIÓN 4.25 Llamamos *repertorio heredado* (*instintivo*, *estereotipado*, *modal* o *rígido*) a la parte del repertorio comportamental de un animal que está controlada por la parte comprometida de su SN; la parte controlada por la porción plástica de su SN es el repertorio *aprendido*.

Comentario 1 «Heredado» no es lo mismo que «innato». Sólo el animal adulto está en posesión de su repertorio comportamental heredado completo. (Vale decir, *Innato* ⊂ *Heredado* ⊂ *Total*). Chomsky (1968) no hizo esta distinción cuando afirmó que la gramática universal es un «esquematismo innato». *Comentario 2* A causa de que la selección natural elimina la mayoría de los tipos de comportamientos que no son exitosos, pareciera que el comportamiento instintivo o programado está maravillosamente ajustado a sus fines. Sin embargo, tal como observó Spinoza (1677, Primera Parte, Apéndice), esto es antropomorfismo puro, y los biólogos y psicólogos contemporáneos encuentran cada vez menos utilidad a las causas finales en la explicación del comportamiento.

Una consecuencia directa del Teorema 4.2 y la Definición 4.25 es el

COROLARIO 4.9 El comportamiento de un animal privado de sus sistemas neurales plásticos es totalmente estereotipado.

La mayor parte del comportamiento heredado ha sido seleccionado porque está adaptado a cierto entorno; vale decir, porque es biovalioso en ese ambiente. (Pero no todo: recuérdese la compulsión de la polilla, de dar vueltas alrededor de una llama). No obstante, si el entorno cambiara de manera radical, algunos de los tipos de comportamientos que antes eran adaptativos perderían su valor. Si unimos estos dos enunciados, tenemos un nuevo axioma:

POSTULADO 4.10 Siempre que el entorno no cambie de forma radical durante la vida de un animal, la mayor parte de su repertorio comportamental heredado tiene para éste un biovalor positivo.

El gran biovalor de poseer un sistema nervioso con subsistemas neurales plásticos es, desde luego, la capacidad de éste para aprender nuevos tipos de comportamientos y, con ello, aumentar las oportunidades del animal de sobrevivir a los cambios ambientales. Por tanto, establecemos el

POSTULADO 4.11 Algunas capacidades heredadas de un animal provisto de sistemas neurales plásticos pueden modificarse mediante el aprendizaje.

Éstos son nuestros principios comportamentales. Ahora nos ocuparemos de los impulsos. Las explicaciones del tipo «*X* come (duerme o se empareja) porque *X* tiene un impulso (o necesidad) de comer (dormir o emparejarse)» no aclaran nada si el concepto de impulso se mantiene como un constructo hipotético oculto. Se transforman en explicaciones

genuinas en el momento en que se interpretan los impulsos en términos fisiológicos, por ejemplo, como detección de desequilibrios (defectos y excesos) de determinadas variables fisiológicas, tales como los niveles de azúcar o noradrenalina en la sangre. En este caso, la hipótesis de que el impulso *Y* causa la conducta *X* puede ponerse a prueba mediante la manipulación del desequilibrio y la observación de los cambios en el comportamiento del animal. Toda la teoría de impulsos puede resumirse en una sola definición y un supuesto:

DEFINICIÓN 4.26 Un *impulso* (o *motivación*) de la clase *X* es la detección de un desequilibrio en los componentes *X* de la función de estado del animal. Con mayor precisión: la intensidad $D_X(b, t)$ del impulso *X* de un animal *b* en el instante *t* es igual al valor absoluto de la diferencia entre los valores normales y detectados de *X* para *b* en *t*.

POSTULADO 4.12 Para todo impulso que tiene lugar en un animal, existe un tipo de comportamiento de ese animal que reduce el impulso (vale decir, que aminora el desequilibrio de la propiedad correspondiente).

La adopción de esta hipótesis permite explicar numerosas pautas de comportamiento sin recurrir a la teleología. Así pues, un ave que construye su nido exhibe un comportamiento producido por un impulso interno (y, más precisamente, un comportamiento motivado por desequilibrios neuroendocrinos). El animal no deja que los estímulos sensoriales aleatorios lo distraigan de su tarea. (Para otros ejemplos del enfoque fisiológico de la motivación, véase Gross y Zeigler, 1969).

En el Capítulo 3 afirmamos que ciertos estados y sucesos son objetivamente valiosos, en tanto que otros no lo son. Ahora daremos un paso más y sostendremos que todos los animales están provistos de receptores que les permiten evaluar algunos estímulos que le llegan como perjudiciales, beneficiosos o indiferentes. Esto no supone que todas sus evaluaciones sean correctas ni, mucho menos, que todos los animales sean conscientes de tales valoraciones y capaces de hacer juicios de valor. Sólo unos cuantos vertebrados superiores son capaces de hacer juicios de valor: en todos los demás, e incluso en el ser humano durante la mayor parte del tiempo, las valoraciones son automáticas. En relación con la valoración [o evaluación], lo que distingue al hombre de otros animales es que el primero puede razonar acerca de los valores y evaluar esas razones. Otros animales no poseen un SNC adecuado para realizar esas

síntesis de razón y valor: se conducen sin ponderar su comportamiento y, si es que razonan, no evalúan sus razonamientos.

En todo caso, decir que un animal es capaz de valorar elementos de cierta clase equivale a decir que posee un sistema de valores, concepto caracterizado por la

DEFINICIÓN 4.27 Sea S un conjunto de elementos y b un animal. Además, sea $\gtrsim_b$ un orden parcial en S. Luego, la estructura $\mathcal{V}_b = \langle S, \gtrsim_b \rangle$ es un *sistema de valores* para b en un instante dado sii

(i) b puede detectar cualquier miembro de S y distinguirlo de entre todos los elementos restantes de S;

(ii) para dos miembros cualesquiera x e y de S, b prefiere x a $y(x \gtrsim_b y)$, a la inversa $(y \gtrsim_b x)$ o ambos $(x \sim_b y)$ en un instante dado.

Comentario 1 Se trata de un concepto comparativo de valor. Un concepto cuantitativo de valor es el dilucidado por la teoría de la utilidad y que aparece en la teoría de la decisión. *Comentario 2* Adviértase la diferencia entre el concepto de psicovalor dilucidado en la Definición 4.27 y el de biovalor, presentado en la Sección 2.2 del Capítulo 3. El biovalor de a para b en t es el valor objetivo que *a posee* para b en t. En cambio, el psicovalor de a para b, en t, es el valor que *b atribuye* a a en t. Estas atribuciones de valor pueden ser erradas desde el punto de vista biológico, en cuyo caso los psicovalores entrarían en conflicto con los biovalores. Los dualistas psicofísicos considerarían que se trata de un conflicto entre la mente y el cuerpo, en tanto que los monistas lo verían como un conflicto entre el cerebro, o un subsistema del mismo, por un lado, y el resto del cuerpo, o un subsistema diferente del cerebro, por otro. En todo caso, puesto que tales conflictos realmente acontecen, es mejor no intentar reducir una clase de valores a la otra, aun cuando ambas valoraciones sean procesos biológicos. *Comentario 3* Se sabe que, para un único organismo, los sistemas de valores cambian, no sólo durante su desarrollo, sino también con las circunstancias. En consecuencia, incorporaremos este hecho a nuestra hipótesis:

POSTULADO 4.13 Todos los animales están provistos de un sistema de valores y aquéllos capaces de aprender pueden modificar su sistema de valores.

Por último, presentaremos la noción de elección. Un animal al que se le ofrece un conjunto de alternativas puede abstenerse de escoger o puede

seleccionar una de ellas. Si ensaya una de las opciones y, a partir de sus errores, averigua cuál de ellas es la que conduce a los resultados más valiosos, se dice que el animal ha aprendido a elegir. Pero en todos los casos, para que haya una auténtica elección tiene que haber cierta libertad. Vale decir, para que haya una elección, el animal debe poder escoger cualquiera de las alternativas que se le presentan y algunas elecciones tienen que ser (por lo menos inicialmente) erróneas (o sea, nocivas). Por consiguiente, formulamos la

DEFINICIÓN 4.28 Sea $\mathcal{V}_b = \langle S, \succsim_b \rangle$ un sistema de valoraciones para un animal b en un instante dado y llámese $A \subset S$ a un conjunto de alternativas que se presentan ante b, es decir, que pertenecen al repertorio comportamental de b en el instante t. Luego, b *elige* (o *selecciona*) la opción $x \in A$ sii

(i) para b es posible escoger (o sea, realizar) cualquiera de las alternativas de A (es decir, b es libre de elegir);

(ii) b prefiere x a cualquiera de las demás opciones de A y

(iii) b realmente escoge (vale decir, realiza) x.

Adviértase la diferencia entre la preferencia y la elección: la primera subyace y motiva a la segunda. La elección es la valoración en acción, o valoración manifiesta, y es, por consiguiente, un indicador de la valoración, no una definición de la misma. Adviértase, también, que no toda elección realiza una decisión. Las decisiones son deliberadas o razonadas (aun cuando no siempre sean racionales) y razonar es un privilegio que sólo tienen unas pocas especies de animales. La mayoría de las elecciones, aun en la vida humana cotidiana, no están precedidas por un largo proceso de decisión.

4. De los recuerdos al conocimiento

4.1. La memoria y el aprendizaje

Numerosos sistemas prebióticos, tales como una espada o un imán, tienen memoria de algunos estados pasados. Esta razón basta para tratar la memoria separadamente del aprendizaje y hasta antes de éste. Una definición general de memoria es la que sigue:

DEFINICIÓN 4.29 Un sistema σ, en el instante t, tiene *memoria de* (o *memoriza*) algunos de sus estados pasados sii el estado de σ en t es una función (un funcional) de esos estados pasados.

Podemos llamar *sistema de memoria* a un sistema que posee memoria. Un sistema de memoria registra («fija en la memoria»), almacena y recuerda cuando se lo estimula de manera adecuada. (En realidad, la segunda propiedad puede no existir: en lugar de mantener un registro, rastro o engrama de un estado, un sistema puede adquirir sólo la disposición de –o propensión a– recordar el estado). Todos los organismos son sistemas de memoria, aunque sólo sea porque poseen genes y éstos registran parte de la historia de la especie. Además de la memoria genética, todos los organismos poseen al menos algún tipo de memoria de corto plazo: de otro modo, no vivirían lo suficiente como para reproducirse. Por consiguiente, podemos proponer el

POSTULADO 4.14 Todos los animales tienen memoria de algunos de sus estados pasados y ninguno la tiene de todos sus estados pasados.

Puede que haya una gran variedad de sistemas o mecanismos de memoria. Podemos clasificarlos en fijos e itinerantes. En tanto que es probable que los invertebrados y los vertebrados inferiores sólo tengan sistemas de memoria fijos (vale decir, sistemas cuya composición neuronal es constante), los vertebrados superiores poseen también sistemas de memoria itinerantes, vale decir, sistemas que se han formado para la ocasión. Estos últimos resultan de especial interés en el caso del hombre, en el cual parece que recordar no consiste en la reactivación de cierto circuito neuronal fijo, sino «en la nueva producción o reconstrucción de un elemento» (Bindra, 1976, pág. 330). De todos modos, memorizar no consiste en un pasivo registrar, sino en una clase de actividad de ciertos sistemas neurales que, posiblemente, suponen el fortalecimiento de las conexiones sinápticas (Anderson, 1972, 1973). Tampoco «almacenamos» los sucesos pasados en la memoria, y mucho menos en la mente: si es que almacenamos algo, lo hacemos en nuestro cerebro.

Algunos sistemas de memoria tienen la capacidad de aprender. Según la Definición 4.9, aprender consiste en la adquisición de nuevas funciones neurales, por lo cual involucra los sistemas neurales plásticos (no sólo sistemas neurales rígidos). Esta definición difiere de la definición comportamental habitual en la que se entiende el aprendizaje como una modificación de la conducta en respuesta a la estimulación. La defini-

ción conductista se ocupa de los efectos, no de las causas, y se la podría aplicar a cualquier cosa, ya que todas las cosas se comportan de manera diferente al ser estimuladas de manera diferente.

Para hacer hincapié en la idea de que aprender es una modificación de la actividad neural, formularemos la

DEFINICIÓN 4.30 Llámese E a una clase de sucesos o procesos del sistema neural de un animal a que incluye un subsistema plástico, y S a una clase de estímulos (externos o internos) que a puede detectar. Luego, a ha *aprendido* $e \in E$ en presencia de $s \in S$ durante el intervalo temporal $[t_1, t_2]$ sii

(i) e no ha acontecido en a en presencia de s antes de t_1;

(ii) después de t_2, e acontece en a cada vez que a detecta s [vale decir, a ha memorizado e].

Puesto que todo el comportamiento está controlado por un sistema neural (Postulado 4.9), la definición previa se adhiere al concepto de aprendizaje comportamental, vale decir, aprender a realizar un movimiento.

Adoptaremos también la

DEFINICIÓN 4.31 La *experiencia* de un animal en un instante dado es el conjunto de todo lo que ha aprendido hasta ese instante.

Vale decir, la experiencia de un animal consiste en su conocimiento aprendido acumulado, o sea, en la colección de cambios de sus sistemas neurales plásticos. Por supuesto, esto incluye el conocimiento no sensorial. En cambio, según nuestra definición, «aprender» a evitar los estímulos perjudiciales no constituye un aprendizaje propiamente dicho, ya que perfectamente puede consistir en un proceso que no involucre ningún sistema neural plástico, tal como sucede, por cierto, en el caso de los invertebrados. Lo mismo vale para la habituación [o acostumbramiento], que consiste en el debilitamiento de conexiones sinápticas existentes (incorporadas) cuando se estimulan repetidamente.

El aprendizaje es creativo –aun el de la tarea más simple– ya que consiste en la formación de nuevas conexiones neurales y, en consecuencia, de nuevas funciones neurales. Esta expansión puede ser o bien cuantitativa (vale decir, puede mantener los mismos ejes), o bien cualitativa (es decir, conllevar el cambio de algunos ejes). La formación de la primera oración de un niño es, presuntamente, un ejemplo de este último tipo de expansión, en tanto que la adición de una palabra más a su repertorio verbal constituye un ejemplo de la primera. Como generalización,

descubrir e inventar pertenecen a la segunda clase, y sólo unos cuantos vertebrados superiores son capaces de ello.

4.2. La anticipación y la finalidad

Hasta aquí nos hemos ocupado de los sistemas no anticipatorios, o sea, de los sistemas cuyo comportamiento no depende del resultado esperado [anticipado] de sus acciones. A continuación, presentaremos la anticipación, una propiedad que sólo poseen los animales de algunas especies, a saber, aquellos capaces de prever o bien una recompensa, o bien un castigo cuando están ante ciertos estímulos o realizan ciertas actividades. Primeramente, adoptaremos la

DEFINICIÓN 4.32 Un animal *b anticipa* (o *prevé*) un suceso futuro de la clase *E* cuando percibe un estímulo (externo o interno) *s* mientras está en el estado *t*, sii *b* ha aprendido a aparear *s* y *t* con el suceso de la clase *E*.

Debido a que la previsión depende del aprendizaje, los animales inferiores, que no tienen capacidad de aprendizaje, tampoco tienen anticipaciones. Pero si un animal puede aprender, entonces tiene anticipaciones y, a su vez, la anticipación ayuda (motiva) el aprendizaje. Los animales capaces de anticipar pueden regular el esfuerzo que invierten en la realización de una acción dada.

Al parecer, todos los vertebrados poseen órganos que desempeñan una función anticipatoria o preparatoria. Ejemplos: las glándulas salivales segregan saliva a la vista del alimento y, cuando el animal ingiere glucosa, las células glucorreceptoras del intestino envían una señal al páncreas que lo estimula a liberar insulina. En ambos casos, un subsistema alerta a otro y las funciones anticipatorias son autónomas o casi autónomas. No sorprende que también el cerebro de los mamíferos posea funciones anticipatorias que, además, son más refinadas: permiten a algunos animales prever y prepararse para lo que pueda sobrevenir. Decimos que estos animales se comportan de manera orientada a fines o deliberada. Dado que la anticipación presupone el aprendizaje, sólo la conducta aprendida puede ser deliberada y, puesto que es aprendida, también es motivada: se prevé que el producto de una acción deliberada produzca una reducción del impulso. En resumen, formulamos la

DEFINICIÓN 4.33 Una acción *X* de un animal *b* posee el *propósito* [fin] o finalidad *Y* sii

(i) *b* puede elegir no realizar *X*;

(ii) *b* ha aprendido que la realización de *X* produce, o aumenta las posibilidades de conseguir, *Y*;

(iii) *b* anticipa la posible ocurrencia de *Y* al realizar *X*;

(iv) *b* valora *Y*.

Adviértanse las condiciones para que haya finalidad: libertad, aprendizaje, anticipación y valoración. Obviamente, sin importar cuán complejas puedan ser, las máquinas no cumplen estas cuatro condiciones y, por consiguiente, no pueden exhibir conductas orientadas a fines; salvo, desde luego, de forma vicaria. El comportamiento animal, en su mayoría, no es deliberado: sólo parece orientado a fines porque es eficiente muy a menudo, pero esta eficiencia es el resultado de mecanismos de control que funcionan sin la intervención de los sistemas neurales plásticos y, por ello, sin aprendizaje ni anticipación.

La afirmación de que los fines no pueden explicarse de manera científica y requieren la hipótesis de una mente inmaterial fue derribada por los cibernéticos, quienes propusieron un mecanismo general y preciso de acción deliberada, a saber, el bucle de retroalimentación negativa (Rosenblueth y otros, 1943, 1950). Desde entonces, los modeladores neurales y los psicofisiólogos han conseguido explicar algunas pautas de comportamiento deliberado específico. Según estos modelos, las finalidades no son estados ni entidades de la mente, sino ciertas pautas de actividad neural. Esta concepción –y no la concepción mentalista de los fines– concuerda con la biología evolutiva, la cual se ocupa de explicar la emergencia de los comportamientos orientados a fines en términos de una conducta nueva, que nada tiene que ver con entidades inmateriales.

Ahora que hemos definido la noción de finalidad, podemos definir la de medio:

DEFINICIÓN 4.34 Una acción *X* de un animal *b* es un *medio adecuado* para la consecución de la finalidad *Y* de *b* sii la realización de *X* por *b* realmente produce, o aumenta la probabilidad de que acontezca, *Y*.

4.3. El pensamiento

La formación de conceptos, proposiciones, problemas y directivas son ejemplos de pensamiento; también lo son la comparación y la transformación de conceptos, proposiciones, problemas y directivas. Suponemos que los pensamientos de toda clase son actividades de un sistema neural plástico y, como tales, actividades sensibles a minúsculos cambios químicos, así como a cambios de las propiedades básicas de las neuronas, tales como la permeabilidad de la membrana. Por ejemplo, los seres humanos que no pueden oxidar el aminoácido fenilalanina son incapaces de pensar en absoluto y los sujetos normales no pueden pensar bien en estados de estrés extremo –los cuales a menudo son estados de desequilibrio hormonal– ni cuando se encuentran bajo el efecto de las drogas psicotrópicas. Quienes creen en la inmaterialidad de la razón tienen que ignorar las pruebas, cada vez más abundantes, a favor de la hipótesis de que el contenido y el nivel de desempeño del pensamiento dependen de esas variables químicas y fisiológicas, además de lo cual, por supuesto, para ser coherentes jamás deben recurrir a estimulantes tales como la cafeína, la nicotina y el alcohol etílico.

Aquí nos ocuparemos solamente de dos procesos de pensamiento básicos, a saber, la formación de conceptos y la formación de proposiciones. Entenderemos la primera como el proceso de formar clases, tales como la clase de los gatos o la de los triángulos. Y conjeturaremos que formar un concepto de la clase «concreta» –vale decir, una clase de cosas o sucesos reales– consiste en reaccionar de manera uniforme a todos los miembros de la clase dada y solamente a ellos. Por consiguiente, adoptaremos el

POSTULADO 4.15 Sea *C* un conjunto de cosas o sucesos (simultáneos o sucesivos). Hay animales provistos de psicones cuya actividad es causada o desencadenada, directa o indirectamente, por cualquier miembro de *C* y es, además, independiente de cuál sea el miembro particular que los activa.

DEFINICIÓN 4.35 Sea *C* una clase de cosas o sucesos, y *b* un animal que satisface el Postulado 4.15, vale decir, que posee un psicón que puede ser activado de manera uniforme por un miembro cualquiera de *C* y sólo por ellos. Luego, *b forma un concepto* $\Theta_b(C)$ de *C* (*concibe C* o *piensa C*) sii la actividad (proceso, función) estimulada por un *C* en ese psicón de *b* es igual a $\Theta_b(C)$.

A continuación, consideremos la formación de proposiciones. Conjeturaremos que la operación involucrada es la de apareamiento de psicones. Por ejemplo, «Los niños están indefensos» aparea «Los niños» con «están indefensos». Dos psicones, posiblemente dos columnas corticales, se activan de forma secuencial; una para cada concepto. La actividad secuencial del sistema de dos componentes constituye el pensar la proposición correspondiente. La idea se resume en el

POSTULADO 4.16 Pensar una proposición es (idéntico a) la activación secuencial de los psicones cuyas actividades son los conceptos que aparecen en la proposición en un orden determinado.

POSTULADO 4.17 Una secuencia de pensamientos acerca de ciertas proposiciones es (idéntica a) la activación secuencial de los psicones cuyas actividades son las proposiciones de la secuencia.

Esto es válido tanto para las proposiciones complejas (tales como las conjunciones) como para las ilaciones de pensamientos, especialmente para las inferencias. También vale, con mayor razón, para el pensamiento racional, o pensamiento controlado por ciertos pensamientos maestros (o reglas maestras), tales como «Aborrece la contradicción», «Comprueba las inferencias» y «Ofrece pruebas o contraejemplos».

De forma consistente con nuestra semántica (Volúmenes 1 y 2), hemos distinguido los constructos (tales como los conceptos y las proposiciones) de los pensamientos acerca de ellos y también de sus expresiones lingüísticas. A diferencia de los constructos, los pensamientos son procesos cerebrales. Por consiguiente, no puede haber dos pensamientos idénticos. Nadie piensa dos veces en el número 5 o en la luna exactamente de la misma manera, aunque sólo fuera porque jamás podemos pasar exactamente por los mismos estados. Sin embargo, podemos suponer que todos los procesos de pensar el número 5 (u otro constructo cualquiera) se ajustan a la misma pauta neural, vale decir, que son equivalentes en un aspecto esencial. Esta noción se dilucida en la

DEFINICIÓN 4.36 Dos pensamientos son *equivalentes* sii consisten en pensar los mismos constructos. Es decir,

$\Theta_a(C) \sim \Theta_b(C')$ sii $C = C'$ para animales cualesquiera a y b.

Hubiera sido deseable definir un constructo como un conjunto de sucesos neurales equivalentes, en lugar de presuponer el concepto de constructo, ya que eso arraigaría los constructos en los sucesos neurales y, a la vez, conservaría su calidad de abstractos. Desafortunadamente, no hemos conseguido encontrar una relación de equivalencia propiamente dicha que nos permitiese construir una definición así.

4.4. La cognición y la decisión

Toda cognición lo es de algún objeto – sea éste concreto o conceptual– y consiste en cierta información acerca de su objeto: completa o parcial, verdadera o falsa. El conocimiento puede ser comportamental (por ejemplo, saber esquiar), sensorial (por ejemplo, conocer el canto de la alondra) o conceptual (por ejemplo, saber que el canto de la alondra está relacionado con su ciclo reproductivo o con la defensa del territorio). Si es comportamental, el conocimiento es una disposición del sistema de control motor a gobernar movimientos de cierta clase; si es sensorial, se trata de una red potencial de perceptos y si es conceptual, es una red potencial de conceptos. En cualquiera de estos casos, la cognición es un proceso cerebral. Resumiremos lo anterior en la

DEFINICIÓN 4.37 Sea *a* un animal. Luego,

(i) si *b* es un tipo (o pauta) de comportamiento aprendido, a *sabe hacer* (o realizar) *b* sii *b* pertenece al repertorio comportamental de *a*;

(ii) si *c* es un constructo, luego *a conoce c* sii *a* piensa (o concibe) *c*;

(iii) si *s* es un suceso, luego *a tiene conocimiento* de *s* sii *a* siente o percibe *s*, o piensa *s*.

Podemos utilizar el concepto de conocimiento para dilucidar el de decisión:

DEFINICIÓN 4.38 Sea *x* un miembro arbitrario de un conjunto *A* de alternativas accesibles al animal *b* con un sistema de valores $\mathcal{V}_b = \langle S, \succsim_b \rangle$. Luego, *b decide elegir x* sii

(i) *b* tiene conocimiento de todos los miembros de *A*;

(ii) $A \subseteq S$ (es decir, *b* prefiere algunos miembros de *A* antes que otros);

(iii) *b* elige, realmente, *x*.

Un mecanismo de decisión posible es el que sigue. Si el animal percibe o piensa diversos objetos y está motivado a elegir de entre ellos, luego, primero los compara. Presuntamente, cada objeto será aprehendido por un psicón a la vez y los niveles de estimulación de los diversos psicones serán diferentes. Si uno de ellos es mayor que los demás, ése prevalecerá y enviará la señal más intensa (o la única) a un psicón de la volición.

La capacidad de tomar decisiones está limitada a los animales que pueden conocer. Pero ni todo el conocimiento es igual ni todas las valoraciones son correctas. Cuando lo son, constituyen la base del conocimiento racional:

DEFINICIÓN 4.39 Una decisión tomada por un animal es *racional* sii está precedida por

(i) un conocimiento adecuado y valoraciones correctas y

(ii) la previsión de los resultados posibles de la acción correspondiente.

DEFINICIÓN 4.40 Un *animal racional* es un animal capaz de tomar decisiones racionales.

Es muy posible que las decisiones racionales no sean de propiedad exclusiva del ser humano: al parecer, algunos primates subhumanos son capaces de tomar decisiones racionales. Y no cabe duda de que ningún animal es racional todo el tiempo.

4.5. La creatividad

Todos los vertebrados superiores son creativos, y el hombre lo es de manera superlativa. Se puede admitir esto y, a la vez, poner en duda la claridad de la noción de creatividad. Ésta resulta clara si la interpretamos en términos de *novedad neural*, vale decir, como la emergencia de nuevos sistemas neurales, o nuevas funciones de ciertos sistemas neurales existentes debidas, por ejemplo, a nuevas conexiones. Estas novedades neurales pueden tener manifestaciones comportamentales o no. Si las tienen, se habla de *comportamiento adaptativo,* en particular, de imitación e invención, según si la novedad aparezca en el animal individual o en toda la especie respectivamente; si no hay manifestación conductual, se habla de creatividad mental. Por tanto, formularemos la

DEFINICIÓN 4.41 Sea *a* un animal de la especie *K* con un repertorio comportamental *B*(*K*) en el instante *t*. Luego

(i) *a inventa* el tipo (o patrón) de comportamiento *b* en el instante $t' > t$ sii *a* realiza *b* por primera vez y *b* no pertenece a *B*(*K*) hasta el instante t';

(ii) *a inventa* el constructo *c* en el instante $t' > t$ sii *a* conoce *c* por primera vez en el instante t' y ningún otro animal de la misma especie conocía *c* antes del instante t';

(iii) *a descubre* el suceso *s* en el instante $t' > t$ sii *a* tiene conocimiento de *s* por primera vez en el instante t' y ningún otro animal de la misma especie tenía ese conocimiento antes del instante t';

(iv) *a* es *creativo* sii inventa un tipo de comportamiento o un constructo, o bien descubre un suceso antes que ningún otro miembro de su especie;

(v) *a* es *absolutamente creativo* sii crea algo antes que ningún otro animal de cualquier especie;

A continuación, la hipótesis:

POSTULADO 4.18 Todo acto creativo es la actividad, o un efecto de la actividad, de sistemas neurales nuevos.

Si bien la creatividad es máxima en los seres humanos, puede que también se la encuentre entre los mamíferos y las aves, a condición de que se supere el prejuicio teológico y empirista contra la creatividad y se investigue el fenómeno de manera científica, especialmente en animales jóvenes en situaciones inusuales. Nos arriesgaremos y supondremos que todos los vertebrados superiores son creativos:

POSTULADO 4.19 Todos los animales provistos de sistemas neurales plásticos son creativos.

Sin embargo, por lo que sabemos, sólo los humanos somos absolutamente creativos, vale decir, capaces de inventar o descubrir ciertas «cosas» antes que ningún otro animal. Utilizaremos este supuesto en la definición de humanidad de la Sección 5.

¿Cuál es el estatus ontológico de las llamadas creaciones de la mente humana? Para ofrecer una respuesta sensata, primero tenemos que distinguir el proceso creativo –ya sea en ciencia, tecnología, arte u otro campo– de sus materializaciones públicas, tales como los libros, las obras de arte y las máquinas. Todos los procesos creativos son procesos que acontecen

en un cerebro (Postulado 4.18). En unos cuantos casos, esos procesos mentales se exteriorizan como cosas o procesos físicos que, cuando son percibidos por observadores capacitados, suscitan en sus cerebros procesos semejantes a los que han experimentado sus creadores. Así pues, en el caso de una pieza musical, se la puede silbar, tocar en un instrumento musical, escuchar, escribir o leer. Las novelas y las teorías, los artefactos y las constituciones son semejantes. ¿Qué sucede con una pieza musical durante el intervalo entre sus interpretaciones o entre las sesiones de audición, o después de que todo el mundo la ha olvidado? No existe. Si el recuerdo de la pieza ha desaparecido de todos los cerebros y todas sus partituras y grabaciones han sido destruidas, esa música ya no existe y no tiene posibilidades de resurrección, salvo por la improbable posibilidad de que sea reinventada. Pero si han quedado algunos vestigios –ya sea en un cerebro, en un papel, en un disco o en una cinta– entonces esa pieza musical tiene la posibilidad de «regresar a la vida». Algo que no se puede tocar en un instrumento, propalar mediante un sistema de audio o algo parecido, y que ni siquiera se puede tararear no es una pieza musical.

Sostengo que lo mismo vale, cambiando lo que haya que cambiar, para todos los objetos culturales. En consecuencia, una escultura que nadie mira no es más que un trozo de materia, al igual que un tratado filosófico que nadie lee. Para las creaciones culturales no hay inmortalidad, pese a que se las pueda exteriorizar («corporeizar») y catalogar. Sólo pervive aquello que es creado, percibido, sentido, pensado y actuado nuevamente. Las bibliotecas, los museos, las galerías de arte y los laboratorios desiertos no son más que cementerios culturales. No hay nada más dependiente y vulnerable –nada menos autónomo– que el «mundo» de la cultura. (Si se deja que el actual desprecio por la ciencia prevalezca pronto no quedará nada de la cultura científica). La cultura no vive en los artefactos culturales, tales como los libros, ni en un fantasmal mundo inmaterial y autónomo: vive en los cerebros de quienes se preocupan por ella, de quienes la cultivan.

Las ideas, por tanto, no existen en sí mismas, como no existen los placeres ni los dolores, los recuerdos ni las intuiciones en sí. En todos los casos se trata de procesos cerebrales. Sin embargo, nada nos impide *simular* que existen ideas, que están «ahí» a disposición de quien las quiera tomar, que es lo que hacemos cuando decimos que alguien «descubrió» tal o cual idea. Simulamos que existen infinitos enteros, aun cuando sólo podemos pensar en un número finito de ellos, y el motivo es que atri-

buimos al conjunto de los enteros propiedades definidas, tales como la de estar incluido en el conjunto de los números racionales. Asimismo, fingimos que todo sistema deductivo contiene infinitos teoremas, y esto es así porque, en caso de necesidad, podemos demostrar cualquiera de ellos. Todas estas ficciones son creaciones mentales y, lejos de ser inútiles o servir únicamente como entretenimiento, constituyen una parte esencial de la cultura moderna. Pero dotarlas de existencia independiente y eficacia causal, tal como han hecho los filósofos idealistas, desde Platón en adelante, o como hace Popper (1968, 1972, 1974, 1977), es animismo puro. Una ecuación diferencial no existe de manera independiente, por lo cual resulta inofensiva; solamente pensar en una ecuación diferencial puede tener ciertos efectos. En resumidas cuentas, las ideas en sí son ficciones y, como tales, no tienen existencia física.

5. Del yo a la sociedad

5.1. Percatación, conciencia y voluntad

En tanto que muchos mentalistas equiparan la conciencia con la mente y los conductistas no admiten ninguno de los dos conceptos, los psicofisiólogos, los neurólogos y hasta los etólogos consideran que ambos son necesarios. Por ejemplo, la sola descripción de las experiencias de yoga, tales como el control voluntario de los latidos del corazón, utiliza el concepto de control consciente inicial. Lamentablemente, el concepto de conciencia todavía es bastante vago, especialmente entre quienes defienden su uso, pero rehúsan terminantemente definirlo (por ejemplo, Popper y Eccles, 1977).

Comenzaremos por distinguir la conciencia de la percatación. Decimos que un animal se percata (o no) de lo que sucede en su entorno o en sí mismo (en particular, de lo que él hace o de lo que le hacen a él). Sólo diremos que el animal es *consciente* si *el animal* se percata de algunos de sus propios procesos cerebrales (no necesariamente de los mentales). Más precisamente, convendremos la

DEFINICIÓN 4.42 Si b es un animal

(i) b se *percata* de (o *advierte*) el estímulo x (interno o externo) sii b siente o percibe x, de lo contrario b *no se percata* de x;

(ii) *b* es *consciente* del proceso cerebral *x* que acontece en *b* sii *b* piensa en *x*, de lo contrario, *b no es consciente* de *x*.

Mientras que la percatación sólo requiere de un sistema sensorial, la conciencia también requiere inteligencia, es decir, la capacidad de pensar y, además, de pensar en sucesos cerebrales. Los animales inferiores pueden percatarse, pero no ser conscientes, y un sujeto consciente puede no percatarse de algunos estímulos externos. Por consiguiente, formularemos el

POSTULADO 4.20 Todos los animales se percatan de algunos estímulos y algunos animales son, además, conscientes de algunos de sus procesos cerebrales.

DEFINICIÓN 4.43 La *conciencia* de un animal *b* es el conjunto de todos los estados del SNC de *b* en los cuales *b* es consciente de algunos procesos del SNC u otros de *b*.

En otras palabras, la conciencia del suceso cerebral *x* es el conocimiento directo de *x*. (De esto se trata la introspección). Además, podemos hipotetizar que un suceso consciente es una actividad cerebral que consiste en la monitorización (registro, análisis, control o seguimiento) de otra actividad cerebral, de forma muy semejante a cómo el voltímetro mide la fuerza electromotriz entre dos puntos de una red eléctrica. Vale decir, adoptamos el

POSTULADO 4.21 Sea *P* un subsistema del SNC de un animal *b* que realiza un proceso mental *p*. Luego, el SNC de *b* contiene un sistema neural *Q*, diferente de *P* y conectado a *P*, cuya actividad *q* es igual a la conciencia de *p* (o pensamiento en *p*) de *b*.

Esta hipótesis dista de ser extravagante: después de todo, cada biosistema es un biosistema de control, vale decir, monitoriza (vigila y controla) su propia actividad. Mediante la detección y corrección de su propio funcionamiento, el biosistema garantiza la normalidad o el regreso a la misma. Por tanto, no debería extrañarnos que el cerebro, el más complejo de los biosistemas y el control supremo del animal, sea capaz de controlar su propia actividad.

Puesto que, por hipótesis, en todos los estados conscientes participan dos sistemas neurales distintos interconectados, es perfectamente posible que éstos interaccionen. En consecuencia, si un sujeto es consciente de una tarea mental rutinaria, éste puede alterarla: la monitorización inter-

fiere con la ejecución de la tarea conocida. Si, en cambio, el sujeto está aprendiendo a realizar una tarea, le conviene tanto percatarse como ser consciente de la misma: el sistema de monitorización guiará el establecimiento del psicón. No es necesario recurrir a una conciencia inmaterial para dar cuenta de este fenómeno (tal como han hecho Sperry, 1969; Popper y Eccles, 1977, y muchos otros). Si se desea especular acerca de la eficacia causal de los sucesos conscientes, se debe hacer dentro del marco conceptual científico de las cosas cambiantes, en lugar de hacerlo dentro del marco mítico de las entidades incorpóreas.

Puesto que la percatación y la conciencia son actividades de un biosistema, se las puede debilitar o intensificar mediante la adecuada inhibición o estimulación de los componentes neurales que participan en cada una de ellas. Estos grados no son otra cosa que las intensidades de las actividades de los respectivos sistemas de control neurales. Si la conciencia fuese una entidad aparte, no sabríamos cómo explicar estas variaciones ni, en particular, la cotidiana desaparición y resurgimiento de la conciencia.

Es sabido que cuando una tarea aprendida se repite, ésta tiende a hacerse automática, vale decir, inconsciente:

POSTULADO 4.22 Durante la vida de un animal capaz de aprender, el comportamiento aprendido, si es consciente al comienzo, se hace gradualmente inconsciente.

Cuando los automatismos demuestran ser insuficientes para resolver un problema o ejecutar una tarea, resulta conveniente hacerse consciente o aumentar la intensidad de la actividad mental consciente. Un animal consciente está en mejores condiciones para afrontar las novedades, ya que puede valorar sus propios pensamientos y acciones, así como criticarlos y, si es necesario, corregirlos. (Para las ventajas adaptativas de la conciencia, véase Griffin, 1976). Dado el biovalor de la conciencia como dispositivo de adaptación instantánea, no sorprende que el ser humano haya tenido tanto éxito, porque su SNC es el único capaz de producir estados conscientes casi a voluntad.

La conciencia, entonces, no es una entidad sino un conjunto de estados de un SNC muy evolucionado. Por consiguiente, hablar de 'estados de conciencia' no es más que pura reificación: sólo hay estados conscientes (o no conscientes) del cerebro. (Recuérdese la Figura 4.3 de la Sección 2.2). Asimismo, es incorrecto hablar del Inconsciente (o del

Subconsciente) como si fuese una entidad, especialmente, una que puede influir en la Conciencia (otra entidad). Se trata sólo de sucesos cerebrales, algunos conscientes y otros inconscientes, y dado que son sucesos concretos, pueden influir en otros sucesos concretos. Lo que vale para la conciencia también es válido para el Ello y el Superego de Freud. No puede haber entidades mentales dentro de las entidades mentales, porque las entidades mentales no son entidades. No cabe duda de que en el cerebro hay sistemas de control: de retroalimentación, por ejemplo. Algunos de esos controles pueden «censurar» (inhibir) ciertas actividades cerebrales, por ejemplo, pueden bloquear el flujo de información hacia el sistema que realiza la monitorización o la actividad de los psicones que realizan el pensamiento. Por ejemplo, se puede haber aprendido el elemento A y, durante el trabajo mental, pensar un elemento B que es incompatible con A. Si A está profundamente arraigado, puede «reprimir» o «suprimir» B, vale decir, puede inhibir el psicón que realiza B. Pero si B es tan vigoroso como A, se pueden activar otros psicones hasta que «se resuelva la contradicción» a favor de una de las opciones originales o de una tercera. Desde el punto de vista fisiológico, esto no es más que un interjuego entre circuitos de retroalimentación neural en competición.

Nuestro siguiente tema es la volición o comportamiento deliberado consciente:

DEFINICIÓN 4.44 Un acto de un animal es *voluntario* (o *intencional*) sii es un acto deliberado consciente; de lo contrario es *involuntario*.

La voluntad no es una entidad, sino una actividad neural: x tiene voluntad de y sii x forma conscientemente el propósito de hacer y. La voluntad tampoco es una misteriosa capacidad de una mente inmaterial, sino una facultad de un SNC muy desarrollado, a saber, «el control del comportamiento por el proceso de pensamiento» (Hebb, 1968, pág. 75). Cuando alguien coge una fruta de un árbol, o un libro de un anaquel, y se percata de lo que está haciendo y, además, tiene el propósito de hacerlo, lo que ocurre es que ciertos psicones de la corteza asociativa –muy probablemente, psicones situados en los lóbulos frontales– activan ciertos centros motores (especialmente la circunvolución), los cuales a su vez controlan los movimientos de las extremidades. Por consiguiente, *las intenciones pueden causar el comportamiento*. Curiosamente, ésta también es una tesis de los filósofos dualistas que defienden la explicación «intencionalista» (en oposición a la explicación científica) del com-

portamiento humano. Sin embargo, no tienen derecho a hacerlo, porque las relaciones causales sólo tienen lugar entre sucesos y los dualistas rehúsan considerar las intenciones como sucesos (neurales).

Los actos voluntarios pueden ser libres o forzados. El general que decide lanzar un ataque puede actuar libremente, pero los soldados que van a la batalla sin desearlo, si bien actúan voluntariamente, también lo hacen de manera forzada. El libre albedrío es la volición más la libre elección de la finalidad, con o sin previsión de las consecuencias posibles. Por consiguiente, formulamos la

DEFINICIÓN 4.45 Un animal actúa por *libre albedrío* sii

(i) su acto es voluntario y

(ii) el animal puede elegir libremente su(s) objetivo(s), vale decir, si no está sometido a ninguna fuerza, programada o externa, que lo obligue a la consecución del objetivo elegido.

Desde luego, el libre albedrío ha sido tanto afirmado como negado por razones teológicas o filosóficas, según el caso. En nuestra teoría, se deduce del Postulado 4.20 en conjunto con las Definiciones 4.44 y 4.45:

TEOREMA 4.3 Todos los animales capaces de estar en estados conscientes son capaces de ejecutar actos voluntarios libres.

Si la conciencia no es exclusivamente humana, tampoco lo es el libre albedrío. Y ambos son objetos legítimos de investigación científica.

5.2. La persona y el yo

Hay diversos conceptos de persona. El que nos interesa es el siguiente:

DEFINICIÓN 4.46 Si *b* es un animal provisto de un sistema neural plástico capaz de ideación (o sea, con una mente no vacía), luego

(i) la *personalidad* de *b* es el sistema funcional compuesto por todas las funciones motrices y mentales de *b*;

(ii) una *persona* es un animal provisto de personalidad.

Comentario 1 De lo anterior se deduce que no sólo los humanos, sino también todos los animales que poseen facultades mentales tienen derecho a ser llamados 'personas'. *Comentario 2* La personalidad es una propiedad de la totalidad del cuerpo: no existe ningún órgano especial de

la personalidad, porque hemos definido ésta como la unión del comportamiento y la ideación. *Comentario 3* Por la misma razón, la destrucción o ablación de porciones importantes del SNC, así como la amputación o la parálisis de los miembros, tienen como consecuencia cambios en la personalidad. La destrucción masiva e irreversible del cerebro destruye la personalidad por completo, en cuyo caso el animal deja de ser una persona, tanto desde el punto de vista psicológico como desde el punto de vista legal. *Comentario 4* El aprendizaje modela y, con frecuencia, enriquece la personalidad; puede, incluso, producir cambios radicales en ésta. *Comentario 5* Los individuos que sufren experiencias terribles (las guerras, los campos de concentración, la prisión o la conversión ideológica) pueden adquirir personalidades totalmente nuevas. *Comentario 6* Durante el sueño profundo o durante el coma, perdemos gran parte, si no toda, nuestra personalidad: nos convertimos en «no personas», o casi. (Pero, por supuesto, cuando despertamos recobramos –o, mejor dicho, reconstruimos– nuestra personalidad). *Comentario 7* Dado que el comportamiento y la ideación de los animales provistos de un sistema neural plástico dependen en parte de su entorno, el mismo animal exhibirá diferentes personalidades en distintos entornos; por ejemplo, quien en casa es un tirano y un cordero en el trabajo. (Para los diversos determinantes de la personalidad, véase Gray, 1972b). *Comentario 8* No hay identidad personal ni personalidad duradera más de lo que hay identidad digestiva o cardiovascular: el comportamiento y la ideación de los vertebrados superiores son más mudables y vulnerables que cualquier otra de sus funciones corporales. (Para una crítica temprana de la idea de identidad personal, véase Hume, 1739, Parte IV, Sección VI). *Comentario 9* Puesto que la mente no es una cosa incorpórea sino una colección de funciones cerebrales y puesto que no existen dos cerebros estrictamente idénticos, los gemelos «idénticos» criados en la misma familia poseen mentes muy diferentes y, por consiguiente, son personas diferentes; no constituyen (como ha afirmado Shaffer, 1977) una única mente con dos cuerpos. *Comentario 10* Dado que los pacientes con el cerebro dividido tienen dos mentes (Corolario 4.7), también tienen doble personalidad, es decir, se trata de dos personas diferentes unidas anatómicamente. *Comentario 11* Si un individuo adquiriese un cerebro nuevo mediante un trasplante, desaparecería tanto la personalidad del donante como la del receptor y surgiría una nueva personalidad. En efecto, en su nuevo contenedor, el cerebro recibiría nuevos estímulos y no recibiría algunos de los estímulos

que antes recibía. Y a causa de que controlaría un cuerpo nuevo, realizaría movimientos diferentes, por lo cual funcionaría de manera diferente. Los yoes originales se perderían. Lo mismo vale, con mayor razón, para el trasplante de cada hemisferio a un cráneo diferente: así se fabricarían dos personas distintas, y es posible que ninguna de ellas fuera viable. En resumidas cuentas, la manipulación de un cuerpo que realiza actividades mentales supone la manipulación de su mente.

Por último, llegamos a la noción de yo, que en nuestra teoría está dilucidada por la

DEFINICIÓN 4.47 Un animal

(i) posee (o está en un estado de) *autopercatación* sii se percata de sí mismo (vale decir, de los sucesos que ocurren en él) como entidad diferente de otras;

(ii) posee (o está en un estado de) *autoconciencia* [o *conciencia de sí mismo*] sii es consciente de algunos de sus estados conscientes previos;

(iii) posee un *yo* en un instante dado sii se percata de sí mismo o es autoconsciente en ese instante.

Comentario 1 Este concepto es más restrictivo que el de mente: todos los animales que poseen un yo (o sea, todos los yoes) realizan actividad mental, pero la inversa es falsa. *Comentario 2* El yo no es una entidad, sino un estado de una entidad, a saber, de un cerebro avanzado. Por consiguiente, en el contexto de nuestra teoría, decir que el yo tiene, o utiliza, su cerebro (Toulmin, 1972; Popper y Eccles, 1977) equivale a decir que ciertos estados cerebrales tienen un cerebro. *Comentario 3* Es posible que, además de los humanos, otros animales tengan autopercatación pero, hasta donde sabemos, sólo los seres humanos tienen autoconciencia, por lo menos cuando son normales y han superado su infancia. El niño pequeño se percata de sí mismo, pero no es autoconsciente. Generalmente se cree que la autoconciencia aparece alrededor de los siete años de edad (Piaget) y a veces se conjetura que se origina como un habla internalizada y, en consecuencia, como un producto de la vida social (Vygotski, 1962; Luria, 1969). Por consiguiente, la autoconciencia es tan antigua como el lenguaje y ambos han evolucionado (y continúan evolucionando) junto con la sociedad. Pero el tema de la sociabilidad merece una nueva subsección.

5.3. El comportamiento social

El canto territorial de un ave y la acción «antisocial» de un delincuente no son menos sociales que la danza de una abeja o la exploración que realiza un babuino en beneficio de su tropa, aun cuando las primeras acciones tiendan a reforzar la soledad, en tanto que las segundas fortalecen el gregarismo. (Cf. Hinde, 1974). La noción en cuestión es dilucidada por la

DEFINICIÓN 4.48 Un animal realiza un *comportamiento social* sii actúa sobre otros individuos del mismo género o éstos actúan sobre él.

La condición de que sean congéneres excluye del repertorio de comportamientos sociales la depredación y la huida de los predadores y, a la vez, incluye el comportamiento reproductivo. Huelga decir que el comportamiento social puede ser automático, en particular, puede estar programado genéticamente, como en el caso de los insectos.

Si bien no todos los animales son gregarios o sociales (vale decir, no viven en comunidades), todos son sociales en el sentido anteriormente expresado, si no de forma realizada, sí al menos de forma potencial. Por consiguiente, supondremos el

POSTULADO 4.23 El repertorio comportamental de todo animal incluye tipos (pautas) de comportamiento social.

Como toda conducta, el comportamiento social está controlado de forma tanto interna –en particular por el SNE– como externa. Por ejemplo, la agresividad depende de un grupo de variables endógenas, tales como ciertas hormonas (especialmente las testosteronas) y la estimulación de ciertos sistemas cerebrales (por ejemplo, el hipotálamo anterior), así como de variables exógenas, tales como la escasez de alimento, el frío y el hacinamiento. Por consiguiente, el determinismo biológico, que sostiene que todo el comportamiento social está determinado en forma exclusiva por las variables endógenas, sólo es válido para animales cuyo comportamiento social es heredado y, por ende, estereotipado. La conducta social de las abejas y las hormigas, el cortejo ritualizado de las aves, y las pautas de agresión y sumisión de los cíclidos, y hasta de los licaones, parecen ser de esa clase. En cambio, parece que los primates heredan solamente aquellas pautas de comportamiento social relacionadas con la reproducción y el cuidado

de las crías: todas las demás se aprenden. Lo que los primates heredan es (*a*) la *necesidad* de mantener relaciones sociales y (*b*) la *capacidad* de formar y cambiar reglas de comportamiento social, así como de formar y deshacer grupos sociales.

Cuando ese comportamiento mejora su suerte, los animales se reúnen en familias y comunidades, temporales o permanentes, con vínculos laxos o estrechos. El más simple de estos sistemas es la familia, y la familia más simple es la constituida por el par madre-infante. La base de este sistema es, por supuesto, el cuidado de la cría. Adviértase que, si bien se forman de manera natural –vale decir, sobre la base de vínculos naturales–, las familias no son biosistemas. Sólo están vivos –metabolizan, son capaces de reproducirse, etc.– los componentes de una familia. Una familia es un sistema social. Estudiaremos en detalle los sistemas sociales en el capítulo siguiente, pero ahora ofreceremos una definición que resultará de utilidad para nuestras reflexiones sociobiológicas:

DEFINICIÓN 4.49 Un sistema σ es un *sociosistema* (*sistema social* o *grupo social*) sii

(i) la *composición* de σ es un conjunto de animales del mismo orden (no necesariamente de la misma especie);

(ii) el *entorno* de σ es el conjunto de cosas distintas de los componentes de σ, que actúan sobre éstos o sobre las que éstos actúan;

(iii) la *estructura* de σ es el repertorio de comportamientos sociales de los miembros de σ.

Toda sociedad es un sociosistema, pero la inversa no es válida: las plantas industriales, las escuelas y los clubes son sociosistemas, pero no son sociedades:

DEFINICIÓN 4.50 Un sociosistema es una *sociedad* sii es autosuficiente [vale decir, si no depende totalmente de otros sociosistemas].

Refinaremos esta definición en el capítulo siguiente.

5.4. Las bases de la cohesión social

¿Qué suscita la formación de un sistema social y lo mantiene unido a pesar de los intereses algo divergentes de sus miembros? Nuestra respuesta es ésta: el cuidado de las crías en el caso de la familia, el com-

partir (o participar) en el caso de otros sociosistemas y la presión social (pacífica o contundente) en todos.

No es necesario que la cooperación ocurra de manera consciente: puede ser automática, como sucede entre los insectos sociales. Los animales pueden cooperar bien en interés propio (como en el caso de los compañeros sexuales y los miembros de una expedición en busca de alimentos), o bien en interés del grupo, como acontece en los casos de una colonia de hormigas y una jauría de lobos. El concepto general está dilucidado en la

DEFINICIÓN 4.51 Si *a* y *b* son animales, luego *a* y *b cooperan* entre sí sii el comportamiento social de cada uno de ellos es valioso para el otro o para un tercer animal.

Cuando la cooperación se refiere a cosas (por ejemplo, bienes) de alguna clase, se le llama *compartición*; cuando se refiere a actividades, *participación*. De forma más explícita,

DEFINICIÓN 4.52 Sea σ un sistema social con una composición $\mathscr{C}(\sigma)$, un entorno $\mathscr{E}(\sigma)$ y con una estructura $\mathscr{S}(\sigma)$. Además, sea $T \subset \mathscr{C}(\sigma) \cup \mathscr{E}(\sigma)$ un conjunto de miembros de σ, o de los elementos del entorno de σ, y $A \subset \mathscr{S}(\sigma)$ una clase de actividad de σ. Luego, para todo componente x de σ,

(i) *x comparte T* sii x coopera con otro(s) miembro(s) de σ al actuar sobre los elementos de T;

(ii) *x participa* en A sii x coopera con otro(s) miembro(s) de σ en la realización de A.

A continuación, nuestra hipótesis de que la asociación está basada en la cooperación:

POSTULADO 4.24 Un conjunto de animales de la misma especie forma un sistema social si y sólo si cada uno de ellos coopera con algún otro miembro del mismo conjunto [vale decir, si comparte los recursos de la sociedad o participa en algunas de sus actividades].

Los primeros evolucionistas hicieron hincapié en la competencia en desmedro de la cooperación, y tanto Freud como Lorenz consideraban que la agresión es instintiva y ubicua. Desde entonces hemos aprendido que la lucha por la existencia incluye tanto la competencia como la cooperación. Por ejemplo, la formación de bandadas y colonias es una defensa eficaz contra los depredadores (Hamilton, 1971). El pastoreo en

grupo, la caza en manadas y la defensa activa suponen la cooperación, por no mencionar las formas más elevadas de sociabilidad, tales como la división del trabajo y los juegos. Sin cooperación no hay sociosistemas.

Únicamente algunas formas de cooperación son deliberadas, menos aún son conscientes. La cooperación deliberada merece un nombre aparte:

DEFINICIÓN 4.52 Para todo animal *a* y *b*,

(i) *a* se comporta de forma *altruista* (o *solidaria*) con *b* sii *a* realiza comportamientos sociales deliberados que puedan resultar de valor para *b*, aunque no así –de forma directa o inmediata– para *a*;

(ii) *a* y *b* son *altruistas* (o *solidarios*) *recíprocos* sii *a* es altruista con respecto a *b* y viceversa.

Una medida tosca de la solidaridad es la que sigue. Sean *a* y *b* animales, y $N(b)$ el conjunto de necesidades de *b* (por ejemplo, alimento, refugio o cuidados) y $G(a, b)$ el conjunto de elementos que *a* está en condiciones de dar a *b*. ($N(b)$ y $G(a, b)$ se consideran durante el mismo período de tiempo). Luego, la solidaridad de *a* hacia *b* es $G(a, b) \cap N(b)$. Una forma de cuantificar este concepto es la que sigue. *El grado de solidaridad* de *a* hacia *b* (durante el mismo período) es

$$s(a, b) = |\, G(a, b) \cap N(b) \,| \,/\, |\, N(b) \,|.$$

(Cuantos más elementos necesarios se den, más solidario será el comportamiento. Los elementos que no son necesarios no cuentan). La solidaridad recíproca entre *a* y *b* es, por supuesto, $s(a, b) + s(b, a)$. Esto mide el número total de elementos intercambiados entre *a* y *b*, independientemente de su valor.

Puede construirse con facilidad un concepto más preciso de solidaridad mediante la asignación de un valor a cada elemento necesario y obtenido. Este valor no tiene por qué ser biológico o psicológico necesariamente: en el caso de los animales superiores, puede ser social, vale decir, los elementos intercambiados pueden beneficiar al grupo como totalidad. Esto sería motivo suficiente para no adherirse al análisis del altruismo en términos de coste y beneficio por los que abogan Hamilton (1964) y Wilson (1975). Este análisis se basa en el supuesto de que los genes son tan listos y conscientes de su pertenencia a una especie que saben que, para un individuo, entregar su vida a cambio de la de tres o más hermanos es un buen negocio, ya que en este caso hay buenas posi-

bilidades de que su dotación génica íntegra (o, mejor dicho, una réplica de la misma) se salve para la posteridad. El altruismo exige un SNC altamente desarrollado, capaz de percatarse de que un individuo de la misma especie se encuentra en situación de necesidad. Saltarse niveles, tal como hacen algunos sociobiólogos, no sirve. (Véase Ruse, 1979, para una evaluación equilibrada de la sociobiología).

Además de las acciones entre individuos que mantienen en funcionamiento al sociosistema, están las influencias del grupo sobre el individuo que impiden que éste rasgue el tejido social. La presión social no es una misteriosa acción del todo sobre la parte, sino la acción (directa o indirecta) de los diferentes componentes de un grupo social sobre los individuos que se desvían de la norma o la moda. Una forma de dilucidar este concepto es la

DEFINICIÓN 4.54 Sea F una función que representa una propiedad de los miembros de un sistema social σ, y supóngase que la distribución de F en $\mathscr{C}(\sigma)$ tiene forma de campana, con un promedio $\overline{F}$ y una dispersión d. Luego, para todo miembro de x de σ,

(i) x se *conforma* a F sii $| F(\mathrm{x}) - \overline{F} | < d$;

(ii) x se *desvía* de F sii x no se conforma a F.

Supondremos lo obvio, a saber, que todo grupo social contiene algunos individuos anormales y que la presión del grupo sobre un individuo aumenta con la anormalidad de éstos:

POSTULADO 4.25 En todo sistema social (*a*) hay individuos anormales en algún aspecto y (*b*) algunos miembros del mismo grupo someten a estos individuos a una presión que es una función monótona creciente de su alejamiento de la norma.

En la mayoría de las sociedades de vertebrados, la estructura social ejerce una reacción bastante débil sobre el comportamiento del individuo. En efecto, las bandadas y manadas de diversas clases se separan, y hasta se disuelven completamente, cuando las condiciones de su entorno se alteran. En las sociedades jerárquicas de los primates, en cambio, la estructura social global parece imponerse mientras el sistema social subsiste. Esto conlleva estabilidad social, así como la esporádica rebelión. Con frecuencia, los individuos anormales, los desfavorecidos o, simplemente, los jóvenes son marginados. En unos pocos casos, éstos pueden encontrar un hábitat más favorable que ofrezca nuevas oportunidades y

desafíos. En otros casos pueden unir sus fuerzas para intentar una reestructuración de su grupo. De todos modos, así como la variedad génica es el motor de la evolución biológica, la anormalidad social constituye un motor de la evolución social.

5.5. La comunicación

Todos los animales sociales, y muchos que no lo son, pueden intercambiar información de alguna clase, y algunos de ellos pueden utilizar una gran diversidad de medios. Adoptaremos algunos de los conceptos estándar que se usan para describir la comunicación animal (Morris, 1938; Smith, 1965). Todos ellos están incluidos en la

DEFINICIÓN 4.55 (i) Una *señal animal* es un proceso físico ejecutado o controlado por un animal, que es perceptible para otros animales y puede modificar su comportamiento;

(ii) el *mensaje* transportado por una señal animal es una representación codificada de sucesos que tienen lugar en el SNC del individuo que envía las señales;

(iii) la *significación* de un mensaje para un receptor es el cambio que acontece en el SNC de éste;

(iv) un animal *comprende* un mensaje si los sucesos desencadenados en su SNC por la señal transportadora son semejantes a los del animal que emitió la señal;

(v) dos animales se *comunican* sii comprenden los mensajes de las señales que intercambian.

Comentario 1 La señal de un animal puede ser brusca, como en el caso de un empujón, o sutil, como en el del canto. *Comentario 2* La comunicación siempre acontece entre dos animales, aunque no siempre de forma directa. Por ejemplo, no nos comunicamos con los ordenadores, sino a través de éstos. *Comentario 3* Si bien la comunicación puede ser valiosa (o nociva) no es necesariamente deliberada. Por ejemplo, las señales que intercambian los insectos sociales no son deliberadas, a causa de que están programadas genéticamente, aun cuando sean funcionales (biovaliosas). *Comentario 4* El concepto psiconeural de significación (Definición 4.55 (iii)) difiere tanto de la noción comportamental (Morris, 1938; Paivio, 1971) como de la de significación semántica (Volumen 2, Capítulo 7).

No todo conjunto de señales constituye un lenguaje. Por ejemplo, el conjunto de los gestos humanos no es un lenguaje. Un lenguaje es un sistema de señales aprendidas y, además, un sistema que permite a un animal componer un número ilimitado de mensajes diferentes. Una simple señal basta para construir un lenguaje si puede concatenarse consigo misma; en cambio, las abejas se comunican sin disponer de un lenguaje: no aprenden sus señales de cero ni pueden generar un número ilimitado de señales a partir de unas pocas de éstas. La siguiente convención resume todo lo anterior:

DEFINICIÓN 4.56 Sea S un conjunto finito no vacío y $\circ$ una operación binaria en S. Además, llámese $\mathscr{L} = \langle S^*, \circ \rangle$ al semigrupo libres [vale decir, al conjunto de encadenamientos de miembros de S]. Luego, $\mathscr{L}$ es un *lenguaje* sii

(i) S^* es un conjunto de señales animales aprendidas;

(ii) hay al menos un animal capaz de comprender algunos de los mensajes que los miembros de S^* transportan.

Comentario 1 Esta definición tiene en cuenta los lenguajes privados, tales como los que pueden inventar los niños sordos (Goldin-Meadow y otros, 1977). A propósito, Wittgenstein y sus seguidores han negado que puedan existir lenguajes privados. *Comentario 2* Los chimpancés pueden aprender ciertos lenguajes de signos (Gardner y Gardner, 1969). Este descubrimiento ha debilitado la hipótesis de que el lenguaje es exclusivamente humano; la ha debilitado, pero no la ha refutado, porque a los chimpancés en cuestión se les enseñó un lenguaje humano, a saber, la lengua de signos estadounidense [ASL, por sus siglas en inglés], mientras que los seres humanos *crean* lenguajes. Además, aunque la ASL posee tanta capacidad expresiva como cualquier otro lenguaje natural humano, los chimpancés no pueden hacer pleno uso de ella porque no pueden pensar todos los pensamientos humanos. *Comentario 3* Mediante el uso de lenguajes prestados, los chimpancés pueden expresar pensamientos propios y, con ello, refutan la afirmación de los dualistas a los efectos de que es «realmente absurdo conjeturar que los animales *puedan* tener pensamientos» (Malcolm, 1973). Ahora sabemos con seguridad, a partir de los experimentos en los que se enseña lenguajes artificiales a los chimpancés, que los animales son capaces de pensar. *Comentario 4* Puesto que es posible entrenar chimpancés para comunicarse, no sólo mediante la ASL, sino también a través de fichas de plástico (Premack, 1971) y de ordenadores (Rumbaugh y otros, 1973), el hombre ya no

puede ser definido como *el animal parlante*. En cambio, obviamente, sí podemos postular que los seres humanos (los chimpancés y, posiblemente, también otros animales) poseen una capacidad, potencialidad o disposición lingüística innata. Esto no quiere decir que el ser humano nazca con el conocimiento de ciertas características estructurales básicas comunes a todas las lenguas naturales. Con lo que sí nacemos es con un tracto vocal, áreas de Broca y de Wernicke y sistemas neurales subsidiarios, así como un entorno social, portador de una tradición, que estimula la adquisición y el desarrollo de los lenguajes verbales.

5.6. Protoeconomía, protocultura y protoorganización política

En el capítulo siguiente, sostendremos que toda sociedad humana, sin importar cuán primitiva o evolucionada sea, está compuesta por cuatro subsistemas principales: de parentesco, economía, cultura y organización política. Sostengo que los cuatro se encuentran ya, en forma embrionaria, en algunas sociedades prehumanas.

Que las sociedades prehumanas poseen un sistema de parentesco, vale decir, una red social basada en la reproducción, parece obvio. Y no cabe duda de que algunas de ellas tienen también un sistema económico, es decir, una red social basada en el trabajo. En cuanto a la política, en el sentido amplio de gestión de las actividades sociales, es sabido que en ciertas sociedades animales la ley y el orden, así como la defensa, están muy organizados. (Cf. Gray Eaton, 1976, para el caso de la sociedad de los macacos japoneses). Menos sabido, pero igualmente cierto, es que algunas sociedades prehumanas tienen una especie de cultura, o sea, un sistema cuyos miembros participan en actividades sociales que son mentales en lugar de biológicas, productivas o de gestión. Además, las pautas de esas actividades pueden ser transmitidas a través de la comunidad, así como a la generación siguiente; vale decir, las tradiciones se forman, se difunden y se mantienen. Esta transmisión se efectúa mediante la imitación y, en ocasiones, también mediante la enseñanza y, por consiguiente, mediante señales. Se ha observado que esto es lo que ocurre entre los macacos japoneses (Kawai, 1965) y los chimpancés (Menzel y otros, 1972). En ambos casos la iniciación de nuevas tradiciones requirió algunos individuos audaces –anormales y creativos– que buscaban la novedad en lugar de temerle.

A causa de que los sistemas económico, cultural y político ya se encuentran en las sociedades prehumanas, aunque en una forma primitiva, debemos caracterizar los conceptos correspondientes:

DEFINICIÓN 4.57 Si σ es una sociedad animal, luego

(i) la *economía* de σ es el subsistema de σ cuyos miembros participan en la transformación activa y organizada del entorno de σ;

(ii) la *cultura* de σ es el subsistema de σ cuyos miembros participan en las actividades mentales que controlan (o son controladas por) algunas de las actividades de otros miembros de σ;

(iii) la *organización política* (o *sistema político*) de σ es el subsistema de σ cuyos miembros controlan (o son controlados por) el comportamiento social de otros miembros de σ.

Un caso particular es el de las sociedades tripartitas compuestas por animales absolutamente creativos, vale decir, animales capaces de descubrir e inventar ciertas cosas antes que otros animales (Definición 4.41). Sostengo que éste es el caso de todos los humanos, desde *Homo erectus*, *H. habilis* y *H. sapiens*, hasta *H. sapiens sapiens*, o sea, nosotros. En otras palabras, supondremos el

POSTULADO 4.26 Una sociedad animal es *humana* sii

(i) algunos de sus miembros son absolutamente creativos y

(ii) está compuesta por una economía, una cultura y una organización política.

Comentario 1 Estamos definiendo la humanidad en términos psicológicos y sociológicos, en lugar de términos puramente biológicos. En esto seguimos la tradición de la antropología y la prehistoria, a la vez que rechazamos el neodarwinismo. *Comentario 2* La cláusula (i) propone que la economía, la cultura y la organización política, en lugar de ser rígidas, son plásticas, tan plásticas como sus miembros. El ser humano no es solamente un animal económico, cultural y político, sino también un animal que puede modificar con gran velocidad casi cualquier característica de esta tríada sin tener que esperar las mutaciones génicas o los cataclismos ambientales: el hombre es el creador y destructor supremo.

Ahora disponemos de todo el material necesario para construir una ontología de la sociedad humana, tarea que emprenderemos en el capítulo siguiente.

6. Comentarios finales

El viento es el movimiento del aire: aparte de aire en movimiento, no hay viento. Asimismo, no hay metabolismo más allá ni por encima de los sistemas que metabolizan, ni cambio social más allá ni por encima de los sistemas sociales. En todas las ciencias fácticas, los estados lo son de entidades concretas y los sucesos son cambios de estado de esos objetos. El mito dualista tolera, y hasta fomenta, el discurso sobre el comportamiento como algo aparte de los animales que se comportan y de la actividad mental como algo aparte o por encima del cerebro. Esta separación entre la mente y aquello que realiza la actividad mental –entre la función y el órgano– ha mantenido la psicología y la filosofía de la mente tradicionales lejos de la neurobiología y, además, ha impedido la plena utilización del enfoque científico en el problema mente-cuerpo. La filosofía del dualismo psicofísico es la responsable del estado de atraso de la investigación sobre ese problema. Por consiguiente, quienquiera que se interese por el progreso de la ciencia de la mente debe rechazar el mito prehistórico de la mente independiente.

El rechazo del dualismo psicofísico no nos obliga a adoptar el materialismo eliminativista en ninguna de sus versiones; vale decir, ni la que propone que la mente y el cerebro son idénticos, por lo cual la primera no existe, ni la que afirma que todas las cosas poseen facultades mentales (esta última versión, desde luego, resulta imposible de distinguir del pampsiquismo o animismo). La psicobiología no sólo propone el monismo psiconeural –la identidad estricta entre los sucesos mentales y los sucesos cerebrales– sino también el emergentismo, es decir, la tesis de que la mente es una propiedad emergente que únicamente poseen los animales provistos de sistemas nerviosos plásticos y complejos. Esta facultad confiere a sus poseedores ventajas tan decisivas y está relacionada con tantas otras propiedades y leyes (fisiológicas, psicológicas y sociales) que justifica la afirmación de que los organismos que la poseen constituyen un nivel con todas las de la ley: el de los *psicosistemas*. Sin embargo, esto no quiere decir que las *mentes* constituyan un nivel distinto, y el motivo es, simplemente, que no existen mentes incorpóreas (ni siquiera corporeizadas), sino únicamente cuerpos que realizan actividades mentales. (Las nociones complementarias de corporeidad e incorporeidad son muy vagas y característicamente dualistas, por lo que –pese a lo que sostiene Margolis (1978)– no hay sitio para ellas en una ontología de inspiración científica).

Dicho de otro modo: se puede sostener que lo mental es emergente, relativamente a lo puramente físico, sin reificarlo. O sea, podemos afirmar que la mente no es una entidad compuesta por cosas de un nivel inferior –y mucho menos una cosa que no está compuesta por ninguna entidad en absoluto– sino una que se trata de una colección de funciones (actividades, procesos) de ciertos sistemas neurales, funciones que las neuronas individuales no poseen. Por consiguiente, consideramos que, en contraste con el materialismo eliminativista, el materialismo emergentista (o sistemista) es compatible con el pluralismo global u ontología que declara la variedad cualitativa y la mutabilidad de lo real. (Cf. Volumen 3, Capítulo 5).

Nuestra adhesión al materialismo emergentista (o sistemista) no implica la afirmación de que éste ha resuelto el problema mente-cuerpo. Lo ha hecho y no lo hará, ya que el materialismo emergentista constituye una filosofía que únicamente proporciona un andamio, o marco general, para la investigación científica detallada de los numerosos problemas que agrupamos bajo el título de 'problema mente-cuerpo'. Les corresponde a los neurocientíficos y a los psicólogos abordar estos problemas; como científicos, no como filósofos aficionados ni, con mayor razón, como teólogos. (Asimismo, el materialismo emergentista sólo proporciona un marco general para la investigación detallada de los problemas de la materia inanimada y la vida, ambos tan inagotables como el problema de la mente).

Con todo, la filosofía dista de comportarse como un mero espectador de la investigación científica del problema mente-cuerpo. La filosofía de la mente de cuño dualista ha obstaculizado de forma activa, durante siglos, el enfoque científico del problema. En cambio, el materialismo emergentista (o sistemista) contribuye a su investigación (*a*) deshaciendo confusiones, (*b*) exponiendo los mitos, (*c*) proponiendo que todos los problemas referentes a los estados o procesos mentales sean considerados problemas referentes a las funciones cerebrales y, por consiguiente, (*d*) fomentando la construcción de modelos neurales de las funciones mentales. De hecho, el materialismo emergentista (o sistemista) es la filosofía de la mente que subyace a la psicofisiología, la psicoquímica y la neurología. Es la única que ha resultado fructífera, que no apoya un reduccionismo quijotesco y que es compatible con una ontología sistemista y dinamista, así como con todas las ciencias.



Capítulo 5

La sociedad

Este capítulo está dedicado a la sociedad humana. Mientras que para el biologismo la sociedad humana es sólo una sociedad animal más, de acuerdo con el espiritualismo no es nada por el estilo, debido a que está guiada por ideas y valores. Escogeremos una concepción alternativa: la sociedad humana es una sociedad animal con numerosas propiedades novedosas, unas pocas de las cuales comparte con las protoeconomías, protoculturas y protoorganizaciones políticas animales. Supondremos que el hombre no es ni un animal a merced de su dotación genética y su entorno, ni un ser espiritual libre semejante a la divinidad: en lugar de todo ello, el hombre es el primate que trabaja y se esfuerza por conocer, que construye, mantiene y transforma las organizaciones sociales mucho más allá de las exigencias de los genes o el entorno, el que crea culturas artísticas, tecnológicas e intelectuales y, además, juega. El hombre es *faber* y *sapiens*, *oeconomicus* y *politicus*, *artifex* y *ludens*.

Ningún aspecto de la humanidad puede comprenderse cabalmente a menos que se tenga en cuenta la quintuplicidad de la naturaleza humana: biológica, psicológica, económica, cultural y política. La propia existencia de la sociedad humana –de su economía, su cultura y su organización política– tiene raíces biológicas que no pueden cortarse, así como restricciones psicológicas difíciles de superar. No se puede filosofar con el estómago vacío ni se puede subsistir –a partir de cierto punto– sin pensamiento nuevo, cooperación ni organización. Los aspectos biológicos, psicológicos, económicos, culturales y políticos van juntos.

La sociedad humana está compuesta por animales, pero no está rígidamente determinada por los factores biológicos, tal como lo prueba la diversidad de tipos de sociedades. Además, el comportamiento social reacciona ante la base animal seleccionando los rasgos social o culturalmente valiosos. Este proceso puede, incluso, oponerse a la selección natural, como cuando protegemos a los minusválidos. En consecuencia, la selección social modifica la composición genética. Por ejemplo, la urbanización y la aglomeración seleccionan la resistencia al estrés y el aire viciado, así como, quizá, la insistencia y la resistencia a la burocracia, pero a la vez mitiga otros rasgos. Esta selección social de las características biológicas y psicológicas modifica la composición genética de la población, cambio que, a su vez, tiene consecuencias sociales. En resumen, existe una estrecha relación entre lo biológico y lo social.

Por consiguiente, la humanidad no evoluciona exactamente igual que las demás especies: actualmente, la teoría de la evolución no es válida para nuestra especie del mismo modo que lo era hace un millón de años. En realidad, tenemos que distinguir formas de evolución: «ciega», animal y social. La evolución «ciega» es la evolución por mutación, recombinación y selección natural; es el modo de evolución propio de las moléculas y las plantas. La evolución animal combina el cambio génico con el comportamiento: el entorno no selecciona únicamente fenotipos, sino también pautas de comportamiento; y los animales no se adaptan sólo filogenéticamente, sino también ontogenéticamente, mediante el comportamiento adaptativo. Por último, la evolución no sólo procede mediante el cambio génico y el cambio comportamental, sino también por medio de la creación y la selección social.

En los tres casos el individuo propone y el entorno dispone, si se me permite la metáfora. Pero en los casos de las selecciones animal y social el individuo aprende, y el entorno, lejos de estarle dado, es en parte escogido y hasta parcialmente rehecho por aquél. Además, en el caso de la evolución social, no sólo influyen los factores biológicos y psicológicos, sino también los económicos, los culturales y los políticos. Además de esto, gracias al lenguaje y la vida social, algunas de las habilidades aprendidas y algunos de los productos de la actividad humana son transmitidos a las nuevas generaciones: aquí podemos hablar de herencia (social) de los caracteres adquiridos. Con todo, incluso esta herencia es plástica, puesto que somos libres de ignorar o enriquecer nuestro legado.

En este capítulo examinaremos el aspecto social del ser humano y

centraremos nuestra atención en las relaciones sociales, así como en la estructura social que de ellas resulta. Nuestro objetivo será aclarar e interrelacionar algunos de los conceptos clave de las ciencias sociales, aquellos que son tan básicos que ninguna ciencia social en particular se digna dilucidar. Lo haremos desde un punto de vista que supera no sólo al biologismo y al espiritualismo, sino también al individualismo y al holismo. Esta alternativa es, desde luego, el sistemismo. Al considerar que la sociedad humana es un sistema concreto de cierta clase en particular y al analizar los diversos subsistemas y supersistemas de la sociedad, esperamos alcanzar algo de claridad respecto de un tema tradicionalmente oscuro. Huelga decir que nuestro discurso será extremadamente general: nuestro objetivo serán algunos de los llamados universales culturales. Por ende, no podremos explicar ni predecir ningún suceso social específico. A lo sumo, ofreceremos un andamiaje para la construcción de teorías específicas en las ciencias sociales.

1. La sociedad humana

1.1. Definiciones

Nuestro Postulado 4.26 caracteriza una sociedad humana como una sociedad animal que incluye algunos individuos absolutamente creativos y está compuesta por una economía, una cultura y una organización política. Este postulado tenía el propósito de definir (de forma implícita) la humanidad antes que la sociedad humana. A continuación definiremos esta última con cierto detalle, dando por supuesto que la biología, la psicología y la antropología física pueden ocuparse de las características biológicas de *Homo*.

Proponemos que la característica principal de la sociedad humana, a diferencia de lo que sucede en otras sociedades animales, es que la primera posee, a un tiempo, la totalidad de las propiedades que siguen:

(i) en toda sociedad humana, algunos de sus miembros *trabajan*, o sea, llevan a cabo de forma regular la transformación deliberada de parte de su entorno (*homo faber*);

(ii) los trabajadores utilizan *herramientas* construidas según modelos estandarizados y trabajan con ellas según las reglas o *técnicas* que han inventado, perfeccionado o aprendido;

(iii) en toda sociedad humana, algunos miembros *gestionan* (administran, dirigen o controlan, o ayudan a dirigir o controlar) las actividades de los demás: organizan el trabajo, el juego, el aprendizaje y la lucha;

(iv) en toda sociedad humana, algunos miembros llevan a cabo de manera regular (si bien puede que no exclusiva) *actividades culturales*: pintar cavernas, narrar historias, diseñar herramientas, curar, calcular, enseñar diversas habilidades, producir conocimiento, etc. (*homo culturifex*);

(v) todos los miembros de toda sociedad humana dedican cierta cantidad de tiempo al juego: al sexo, la danza, la actuación, las carreras, el escondite, los juegos de azar, etc. (*homo ludens*);

(vi) todos los miembros de toda sociedad humana se *comunican* con miembros de la misma sociedad, o de otras sociedades, por medio de signos estandarizados, especialmente, de un lenguaje;

(vii) todos los miembros de toda comunidad humana *comparten* información, servicios o bienes con otros miembros de la misma comunidad;

(viii) todos los miembros de toda sociedad humana *aprenden* actitudes, habilidades e información no sólo de sus padres, sino también de otros miembros de su comunidad (por imitación o mediante enseñanza formal);

(ix) toda sociedad humana está dividida en *grupos sociales*, tales como las familias y los grupos profesionales;

(x) toda sociedad humana subsiste en tanto cada uno de sus miembros *participe* en alguna medida en diversas actividades sociales, y se beneficie con esa participación.

No cabe duda de que otros animales –como, por ejemplo, las abejas y los castores– también trabajan; pero no utilizan herramientas. Otros, sin embargo, sí utilizan herramientas, tales como ramitas, piedras o espinas, pero lo hacen sólo de manera esporádica y, en todo caso, no son ellos quienes les dan forma o, por lo menos, no lo hacen según un modelo estandarizado. Además, algunas aves y algunos mamíferos pueden jugar y otros, incluso, han desarrollado sistemas de señales codificados (aunque no lenguajes propiamente dichos). Con todo, sólo los seres humanos organizan (gestionan) algunas de sus actividades *y* enseñan pautas de comportamiento, sentimientos y pautas de pensamiento, además de crear objetos nuevos (artefactos, obras de arte, organizaciones y palabras, entre otros). En síntesis, sólo los humanos poseemos *la totalidad de las diez* propiedades que acabamos de listar, si bien no individualmente, sí como sociedad.

Pese a ser esquemática, de momento, esta caracterización de la sociedad humana resultará suficiente. A continuación, la expresaremos sirviéndonos de los conceptos dilucidados en los capítulos anteriores:

DEFINICIÓN 5.1 Un sistema concreto σ es una *sociedad* (o *comunidad*) *humana* sii σ es una sociedad animal, tal que

(i) la *composición* $\mathscr{C}(\sigma)$ de σ está incluida en el conjunto de los seres humanos (vale decir, en el género *Homo*, no necesariamente en nuestra especie);

(ii) el *entorno* [*medio* o *ambiente*] $\mathscr{E}(\sigma)$ de σ contiene algunos elementos necesarios para la supervivencia de los componentes de σ;

(iii) la *estructura* $\mathscr{S}(\sigma)$ de σ es igual a la unión disjunta de dos conjuntos de relaciones, S y T –llamadas *relaciones sociales* y *relaciones de transformación*, respectivamente– tal que

(a) S incluye la relación de descendencia biológica y todas las demás relaciones (de parentesco) que derivan de ella;

(b) todo miembro del conjunto S de relaciones sociales está acompañado de comunicación (flujo de información);

(c) S incluye las relaciones de compartición (servicios y bienes) y participación (en actividades sociales);

(d) S incluye un conjunto no vacío $M \subset S$, llamado *gestión* [administración], tal que todo miembro de M es una relación en alguna potencia cartesiana entre los miembros de $\mathscr{C}(\sigma)$ y ésta representa ciertos actos habituales que los miembros de σ realizan sobre otros miembros de éste, actos que consisten en controlar ciertas relaciones pertenecientes a S (por ejemplo, el cortejo o el aprendizaje) o a T (por ejemplo, la caza o el roturado de la tierra);

(e) el conjunto T de relaciones de transformación incluye un conjunto no vacío $W \subset T$, llamado *trabajo*, tal que todo elemento de W sea una relación que aplica un subconjunto de $(\mathscr{C}(\sigma))^p \times (\mathscr{E}(\sigma))^q$, donde $p, q \geq 1$, a otro subconjunto propio no vacío A de $\mathscr{E}(\sigma)$ que representa la transformación habitual que realizan algunos miembros de σ, de ciertas cosas pertenecientes a $\mathscr{E}(\sigma)$ (del mineral de hierro, por ejemplo) en cosas pertenecientes a A (herramientas de hierro, por ejemplo) llamadas *artefactos*;

(iv) las relaciones sociales S y las relaciones de transformación T generan relaciones de equivalencia que inducen particiones de la composición de σ en dos grupos sociales (diferenciación social);

(v) mientras dura, σ es autosuficiente, vale decir, es capaz de satisfacer sus necesidades mediante el trabajo.

Según esta definición, no todo grupo humano, ni siquiera todo sociosistema (Definición 4.49) constituye una sociedad humana: para serlo, una colección de seres humanos debe compartir un entorno, transformarlo de forma deliberada (mediante el trabajo, no solamente a través del desgaste del mismo), mantener relaciones sociales y comunicarse entre sí, estar dividida en grupos sociales y constituir una unidad autosuficiente. En consecuencia, una fábrica, una escuela y un ejército, pese a ser subsistemas de una sociedad y, por consiguiente, sociosistemas, no son sociedades. Además, las relaciones sociales entre los miembros de la sociedad deben incluir relaciones de transformación de los propios humanos M, tales como la educación, la organización y la coacción, además de lo cual deben establecerse y mantenerse mediante la comunicación.

Hasta aquí llega nuestra rápida caracterización de los sistemas concretos que llamamos 'sociedades humanas' y constituyen la composición del conjunto de todas las sociedades humanas, pasadas, presentes y futuras. Hagamos hincapié en que se trata de sistemas, no sólo de cosas o agregados de cosas; muchísimo menos de entidades de naturaleza inmaterial. Advirtamos, además, que si bien las sociedades están compuestas por organismos, no poseen las propiedades características de los organismos: no sintetizan proteínas ni se reproducen mediante la división celular o la conjugación, por ejemplo. En realidad, las sociedades poseen propiedades globales o sistémicas, algunas de las cuales son peculiares de ellas:

DEFINICIÓN 5.2 Sea P una propiedad. Luego,

(i) P es una *propiedad social* sii existe (ahora o en cualquier otro instante) una sociedad humana que posea P;

(ii) si P es una propiedad social de una sociedad σ, entonces P es una *propiedad resultante* de σ sii P es, a la vez, una propiedad de algunos componentes de σ;

(iii) si P es una propiedad social de una sociedad σ, entonces P es una *propiedad emergente* de σ sii P no es una propiedad resultante.

Ejemplo 1 El consumo anual total de alimentos de una sociedad dada es una propiedad resultante de ésta, ya que no es más que la agregación aditiva de los consumos individuales. Ése no es el caso del consumo

total de energía ni, mucho menos, de la producción total, que son sólo sociales. Asimismo, la estructura familiar, la organización política y la cohesión de una comunidad son propiedades sociales emergentes. *Ejemplo 2* Todos los miembros de una sociedad poseen propiedades que no son ni individuales ni sociales, tales como la timidez y la conformidad (o, su complemento, la anormalidad). Pensemos en esta última, que hemos analizado en la Definición 4.54. En ella, 'F' representa una propiedad de un individuo, el promedio $\overline{F}$ es una propiedad resultante de un sociosistema y la desviación estándar d de la distribución de valores 'F' en la sociedad representa una propiedad emergente de la misma. (Tanto es así, que si d es pequeña, podemos decir que el sociosistema es conformista).

Nuestra primera hipótesis es que el concepto de propiedad social emergente no es vano:

POSTULADO 5.1 Toda sociedad posee propiedades emergentes.

Nos apresuramos a advertir, empero, que 'emergente' no significa ni «inexplicable» ni «impredecible». En primer lugar, porque «emergencia» es una categoría ontológica, no una gnoseológica. En segundo lugar, porque las tareas de la ciencia consisten no sólo en reconocer la emergencia, sino también en desarrollar teorías que la hagan comprensible y, en ocasiones, predecible.

1.2. Subsistema, supersistema, función específica

Toda sociedad, independientemente de cuán primitiva sea, está compuesta de diversos subsistemas. Y casi todas las sociedades humanas contemporáneas son subsistemas de un sistema social más abarcador, tales como las provincias, las naciones, los sistemas regionales y el sistema mundial. Por consiguiente, necesitamos la

DEFINICIÓN 5.3 Sea σ una sociedad humana. Luego,

(i) todo sistema social σ', tal que σ' sea un subsistema de σ (vale decir, $\sigma' \precsim \sigma$) es un *subsistema social* de σ;

(ii) toda sociedad σ', tal que σ sea un subsistema de σ' (vale decir, $\sigma \precsim \sigma'$) es un *supersistema social* de σ.

Ejemplo El sistema de salud de una comunidad moderna es un subsistema de la misma caracterizado por las siguientes coordenadas:

Composición: médicos, enfermeros, administradores, empleados administrativos, personal de limpieza, pacientes internos, pacientes externos, etc.;

Entorno inmediato: instalaciones hospitalarias, muebles, instrumental, ambulancias, familias de los miembros del sistema, etc.;

Estructura: relaciones de diagnóstico y pronóstico, medicación y operación, consulta y otros actos dirigidos a los pacientes, suministro de información a sus familias, tareas de organización, enseñanza, aprovisionamiento, mantenimiento de la limpieza de las salas, etc.

No todos los componentes de un sistema social son subsistemas sociales del mismo. Así pues, las personas que componen un sistema social son biosistemas, no sociosistemas. Tampoco son sistemas sociales todos los subconjuntos de la membresía (composición) de un sistema social. Por ejemplo, los empleados de una planta industrial y los alumnos de un colegio no tienen por qué ser sistemas sociales. Un grupo de personas se convierte en un sistema únicamente cuando se organiza y actúa, en ciertos aspectos, como una totalidad (por ejemplo, yendo a la huelga). Con mayor razón, la clase obrera y la población estudiantil pueden no constituir sistemas.

Pensemos en un conjunto homogéneo de subsistemas de una sociedad dada, tal como la colección de todas las granjas, todos los sistemas de recolección de residuos y todos los sistemas de tratamiento de los mismos, o de todas las escuelas. Estos conjuntos no son sistemas, sino *clases* de sistemas. Llamaremos a todo conjunto arbitrario como los anteriores sistema F, expresión en la que F representa la función (o funciones) que caracteriza(n) a los subsistemas miembros y los distingue(n) de otros. Más precisamente, proponemos la

DEFINICIÓN 5.4 Sea σ una sociedad humana y llamemos

$$S(\sigma) = \{\sigma' \in \Sigma \mid \sigma' \lesssim \sigma\}$$

a la colección de todos los subsistemas sociales de σ. Además, sea F cierto conjunto de relaciones sociales o relaciones de transformación, vale decir $F \subset S \cup T$, y sea

$$F(\sigma) = \{\sigma' \in S(\sigma) \mid F \subset \mathcal{S}(\sigma')\} \subset S(\sigma)$$

la colección de subsistemas de σ en la que son válidas las relaciones F. Luego,

(i) llamaremos *sector-F* de σ a $F(\sigma)$;

(ii) llamaremos *función genérica* de los subsistemas de σ a $G(\sigma) = \bigcap_{\sigma' \in S(\sigma)} \mathcal{S}(\sigma')$;

(iii) llamaremos *función específica* del sector F de σ a $F_S(\sigma) = \bigcup_{\sigma' \in F(\sigma)} \mathcal{S}(\sigma') - G(\sigma)$.

Para poner esta definición en acción, piénsese, por ejemplo, en los sectores comercial minorista, escolar, industrial y de correos de una comunidad: véase la Figura 5.1.

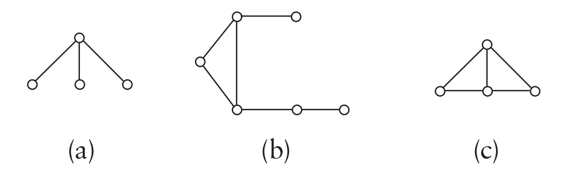


Figura 5.1. Tres sectores: (a) el sistema escolar (conectado de forma indirecta a través de las juntas escolares) o los sistemas comerciales (conectados indirectamente mediante los distribuidores mayoristas); (b) el sistema industrial (en el cual los insumos de ciertos subsistemas son los productos de otros subsistemas); (c) el sistema de correos (controlado por el correo central).

En todos estos casos, los subsistemas en cuestión desempeñan ciertas funciones peculiares que los distinguen de otros subsistemas pertenecientes a otros sectores; pero también comparten diversas funciones propias de todos los subsistemas sociales, tales como el consumo o la transformación de energía, la producción de desechos y la comunicación con otros subsistemas de la comunidad.

Las sociedades primitivas tienen relativamente pocos sectores; por ejemplo, el sector de los trabajos domésticos, el sector de los cazadores, el sector de los fabricantes, el sector cultural (que, en realidad, es un sistema) y otros pocos más. A medida que la sociedad se desarrolla, algunos sectores se extinguen y otros emergen. Las sociedades industriales se caracterizan por el gran número y gran tamaño de sus sectores. También se caracterizan por una creciente sistematización de los mismos, vale decir, un acoplamiento cada vez mayor entre los miembros de sus sectores. Por consiguiente, en una economía monopolística toda unidad económica es miembro de un sistema estrechamente conectado. El concepto general está dilucidado en la

DEFINICIÓN 5.5 El sector-*F* $F(\sigma)$ de una sociedad σ es el *sistema-F* de σ sii los miembros de $F(\sigma)$ constituyen la composición de un subsistema de σ.

Por último, supondremos el

POSTULADO 5.2 Toda sociedad humana posee diversos sectores. Además, (*a*) cada miembro de una sociedad humana pertenece a por lo menos dos sectores de la misma y ningún individuo pertenece a todos los sectores a la vez; y (*b*) en toda sociedad humana, algunos sectores son sistemas.

Comentario 1 Dicho de otro modo, en toda sociedad, independientemente de cuán primitiva sea, hay cierta división del trabajo. Sin embargo, la división del trabajo que presentan las sociedades humanas jamás es tan rígida como la que se da en las sociedades de insectos. *Comentario 2* El axioma anterior, junto con el postulado gnoseológico de cognoscibilidad, implica el teorema metodológico de que toda sociedad debe analizarse distinguiendo diversos sectores y, en particular, subsistemas. Lo que actualmente se llama análisis de sistemas grandes consiste, en gran medida, en este tipo de análisis o reconocimiento, y caracterización de los sectores y subsistemas de una sociedad dada, tales como el sistema de transporte de una ciudad y el sistema comercial de una región.

1.3. Las instituciones

La palabra 'institución' es ambigua: en ocasiones denota un sociosistema individual de cierta clase, tal como una escuela determinada, y en otras denota un conjunto de acciones y normas sociales, tales como el matrimonio y el culto religioso. Aquí nos interesa otra acepción de la palabra 'institución', a saber, la que se usa cuando se habla de la Familia, el Correo, la Burocracia y la Ley.

Los filósofos sociales están divididos en lo referente a la naturaleza de las instituciones y, por ello, en lo tocante a la manera adecuada de estudiarlas. En este campo, las dos doctrinas clásicas son el holismo y el individualismo. El primero considera que una institución, tal como la Ley, es un corpus de reglas o leyes incorpóreas que los individuos hacen cumplir, cumplen o violan. Según esta concepción, la institución flota sobre las personas y, además, es superior a ellas y más valiosa que ellas. No sorprende que el holismo, en alguna de sus formas, sea inherente a

las ideologías totalitarias. Los individualistas rechazan esta abstracción y consideran que la Ley es el conjunto de jueces, abogados y policías, con absoluta prescindencia de los sujetos de la Ley, a saber, los ciudadanos de a pie. Cuando se les presenta una oración tal como 'La Ley obliga a *X* a hacer *Y*', el individualista la traduce a 'El juez (o el policía) *U* obliga a *X* a hacer *Y*'. Pero, desde luego, se trata de un pobre sustituto del original, ya que la persona *U* encargada de hacer cumplir la ley se comporta del modo en que lo hace por lo que ella es, a saber, un miembro de cierto sistema legal con un código de procedimientos legales. Diferentes individuos podrían haberse comportado aproximadamente del mismo modo. En cambio, esos mismos individuos podrían haberse comportado de manera diferente en sistemas legales diferentes. En conclusión, el sistema legal en cuestión no es ni un conjunto que incluye los individuos *U* y *X*, ni un conjunto de reglas supraindividuales. Por consiguiente, pese a que tanto el holismo como el individualismo tienen sus razones, ninguno es capaz de explicar la conducta del individuo en sociedad. El fracaso del holismo se debe a que postula totalidades que trascienden a sus componentes; el del individualismo, a que ignora las totalidades.

Nuestra perspectiva sistemista es como sigue. Un sistema legal es un subsistema de cierta sociedad, vale decir, una parte de una comunidad humana en la que se producen relaciones sociales de tipo *M* peculiares, tales como las de juzgar y dictar sentencia. Y eso que llamamos la Ley, con una mayúscula imponente, es la colección de todos los sistemas legales. De forma general, entenderemos que una institución es el conjunto de todos los sectores-*F* de todas las sociedades, sin importar su cercanía espacial y temporal. Por consiguiente, a la colección de todos los sectores escolares le llamamos la Educación; al conjunto de todos los sindicatos, el Sindicalismo; al conjunto de todos los sistemas postales, el Correo, y así sucesivamente. (Recuérdese la Definición 5.4 de sector-*F*, así como la Definición 5.5 de sistema-*F*). Por consiguiente, propondremos la

DEFINICIÓN 5.6 Sea $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \ldots, \sigma_m\}$ un conjunto de sociedades humanas y llámese F_{ik} al *k*-ésimo sector de la sociedad σ_i, es decir:

$$F_{ik} =_{df} = F_k(\sigma_i) = \{\sigma' \in S(\sigma_i) \mid F_k \subset \mathscr{S}(\sigma')\},$$

donde F_k designa cierto conjunto de relaciones, sociales o de transformación. Luego, la familia de sectores-*F*

$$\mathscr{F}_k = \{F_{ik} \mid F_{ik} \text{ es el } k\text{-ésimo sector de } \sigma_i \;\&\; \sigma_i \in \Sigma \;\&\; 1 \leq i \leq m\}$$

se llama *institución-F* de Σ.

De acuerdo con nuestra interpretación, por ende, una institución no es ni un sociosistema individual ni un conjunto platónico de reglas, normas o fines que gobierna a la gente desde arriba. Con todo, puesto que una institución es una *familia de conjuntos* de cosas concretas, es tolerablemente abstracta. (Una abstracción pura es una abstracción que, a diferencia de $\mathscr{F}_k$, no se reduce a particulares concretos. Las abstracciones puras pertenecen a la lógica y a la matemática, pero resultan intolerables en cualquier otro ámbito). Atribuir a este conjunto de conjuntos las propiedades de los individuos concretos, tales como la vida (o, peor todavía, la vida eterna), una mente propia (o, peor, una mente desquiciada), agresividad o la posibilidad de entrar en conflicto con otros tipos semejantes (por ejemplo, otras instituciones) es incurrir en una reificación.

Adviértase que no todo lo que suele tenerse por una institución en el lenguaje corriente cumple las condiciones para serlo de acuerdo con nuestra definición. Por ejemplo, el Trabajo, la Guerra, el Matrimonio y el Dinero no lo son, porque no se trata de familias de conjuntos de subsistemas sociales.

Podría objetarse que nuestra definición de institución pasa por alto un ingrediente esencial, a saber, los objetivos de las normas de la institución. Así pues, cuando se aplica al caso de la Ley considerada como institución, nuestra convención no parece admitir los códigos ni los procedimientos jurídicos que regulan las relaciones propias de todo sistema legal. El papel que desempeñan estas reglas es tan importante que algunos filósofos y científicos sociales han llegado al extremo de identificar una institución con el conjunto de sus normas o reglas. Aunque exagerado y decididamente platónico, este enfoque contiene una pizca de verdad: resulta evidente que, a menos que se respeten ciertas reglas, la institución (o, mejor dicho, cada uno de los subsistemas que la componen) declina y hasta se extingue. Sin embargo, de ello no se deduce que un conjunto de reglas institucionales (por ejemplo, el estatuto de una asociación) sea una Idea que pende sobre los correspondientes subsistemas sociales, y mucho menos que el primero sea idéntico a los segundos.

Las reglas institucionales no son más que la forma en que, según se piensa (acertada o erróneamente), los subsistemas correspondientes funcionan de manera óptima en interés de la sociedad o de algún grupo so-

cial. Si se lo prefiere, esas normas son prescripciones para hacer funcionar el subsistema en forma eficiente, vale decir, para alcanzar los fines de sus miembros o, mejor dicho, de aquellos a quienes, se supone, ese sistema debe beneficiar. No cabe duda de que, en su mayor parte, tales reglas institucionales se pueden explicitar, del mismo modo que es posible hacer explícitas en cierta medida las reglas para llevar a cabo adecuadamente una tarea o jugar un juego. Pero el hecho de poner una regla por escrito no le confiere una existencia independiente: lo único que, tal vez, hace es sugerir esa existencia, quizá porque cuando se la escribe en una placa de arcilla, una losa de piedra o un papiro puede durar más que el autor. El juez recto e inclemente hace cumplir las normas del mismo modo que un capataz hace cumplir las reglas de un manual de operaciones.

Podemos llamar 'dirigidos por reglas' a los actos que observan las reglas de un juego institucional, a condición de que con ello no estemos proponiendo la tesis idealista de que las reglas existen independientemente de quienes las crean, de quienes las hacen cumplir y de quienes las cumplen; del mismo modo que las leyes naturales no existen aparte de las cosas que las satisfacen. Las reglas de comportamiento social son inherentes a las propias relaciones que se dan entre los miembros del sistema en cuestión. (Casi lo mismo es válido para toda desviación de ese comportamiento: el delincuente puede estar fuera de la ley, en el sentido de que no respeta el código jurídico, pero es tan miembro del sistema legal como el juez, tanto que allí donde no existe la oportunidad de delinquir no es necesario ningún sistema legal). En resumidas cuentas, las reglas institucionales, así como las pautas de violación de esas reglas y las reglas que castigan esas violaciones, están integradas en la propia red de relaciones sociales que mantiene unido al sistema. Y la que las sanciona, o castiga las desviaciones respecto de esas reglas, no es «la sociedad», sino algunos miembros de la sociedad, a saber, quienes tienen a cargo la regulación del funcionamiento del sistema social. Cuando se conciben las reglas institucionales como pautas para el funcionamiento óptimo –o, por lo menos, deseado– de los sistemas sociales, resulta más fácil comprender cómo se originaron esas reglas, dónde fallan y cuáles de sus aspectos podrían mejorarse, sino rechazarse de plano.

Y hasta aquí nuestro marco conceptual preliminar. A continuación analizaremos con mayor detalle algunos de los conceptos característicos de las ciencias sociales, comenzando por el de trabajo.

2. Los subsistemas y supersistemas sociales

2.1. El trabajo

El trabajo, una de las peculiaridades del comportamiento humano, es una clase de actividad; no se trata sólo de una acción, sino de una acción que se lleva a cabo con regularidad. Una actividad, la realice un animal o una máquina, puede definirse como una secuencia pautada de acciones orientadas a una finalidad predeterminada. Por consiguiente, lejos de ser errática, una actividad acontece de tal forma que, normalmente, la diferencia entre lo conseguido y lo que se desea conseguir disminuye gradualmente (Wiener, 1948, capítulo IV). Véase la Figura 5.2. Resumiremos estos comentarios en la

DEFINICIÓN 5.7 Un sistema realiza una *actividad* sii ejecuta una secuencia de acciones orientadas a fines.

Para que un sistema realice una actividad es necesario y suficiente que sea un sistema de control y que éste –o aquello que lo controle– posea una finalidad determinada. En el caso del trabajo, el propio trabajador, junto con sus herramientas, constituye un sistema de control.

A diferencia de las máquinas, los humanos somos sistemas versátiles o multipropósito: podemos realizar actividades de muy diversas clases. Esta multiplicidad puede representarse como sigue. Llámese ${}^{\sigma}A_{mn}$ a la acción realizada por el sistema σ sobre el m-ésimo aspecto (propiedad) de la n-ésima cosa situada en el entorno de σ. Luego, la actividad total de σ está representada por su matriz de actividad ${}^{\sigma}A = \| {}^{\sigma}A_{mn} \|$. Se trata de una matriz $M \times N$, en la cual M es el número de propiedades y N el número de cosas influenciadas por σ. Una entrada vacía corresponde a una característica inexistente de la cosa correspondiente. Si una comunidad entera, o un sector de ella, con composición S, realiza un conjunto de actividades, podemos definir la actividad agregada de la comunidad o el sector como la matriz

$$A = \bigcup_{x \in S} {}^{x}A,$$

cada entrada de la cual es la unión conjuntista de las entradas parciales con los mismos índices.

El trabajo es una clase especial de actividad, a saber, una que se considera útil. Lo definiremos del siguiente modo:

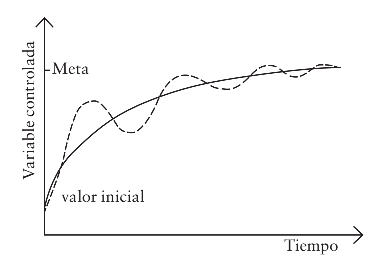


Figura 5.2. Un sistema que, de manera asintótica, alcanza un estado meta de una de dos maneras típicas: (*a*) de forma monótona (línea continua) o (*b*) por ensayo y error (línea punteada). Adviértase, en este último caso, el fenómeno consistente en que el sistema sobrepasa el estado meta.

DEFINICIÓN 5.8 Si x es un sistema, luego x *trabaja* sii, existe una cosa y y un animal z (igual o diferente a x) tal que

(i) x ejerza una actividad sobre y (excepto comerse a y) y con ello produzca un cambio apreciable en el estado de y, y

(ii) la cosa y en su nuevo estado producido por la actividad de x sea de valor para z.

Distinguiremos tres clases de trabajo, a saber, el trabajo primario (L), el trabajo cultural (K) y la gestión (M). La finalidad del trabajo primario es transformar cosas no humanas en cosas más valiosas; el trabajo cultural tiene como finalidad última modificar las funciones cerebrales y la gestión consiste en la regulación del trabajo manual, así como del trabajo cultural. Véase la Figura 5.3. En primer lugar, examinemos el trabajo primario.

2.2. El trabajo primario

Comenzaremos proponiendo la

DEFINICIÓN 5.9 Sea σ una sociedad con una composición $\mathscr{C}(\sigma)$, un entorno $\mathscr{E}(\sigma)$ y una estructura $\mathscr{S}(\sigma) = S \cup T$; y llamemos L a un subconjunto de relaciones de transformación de σ. Luego,

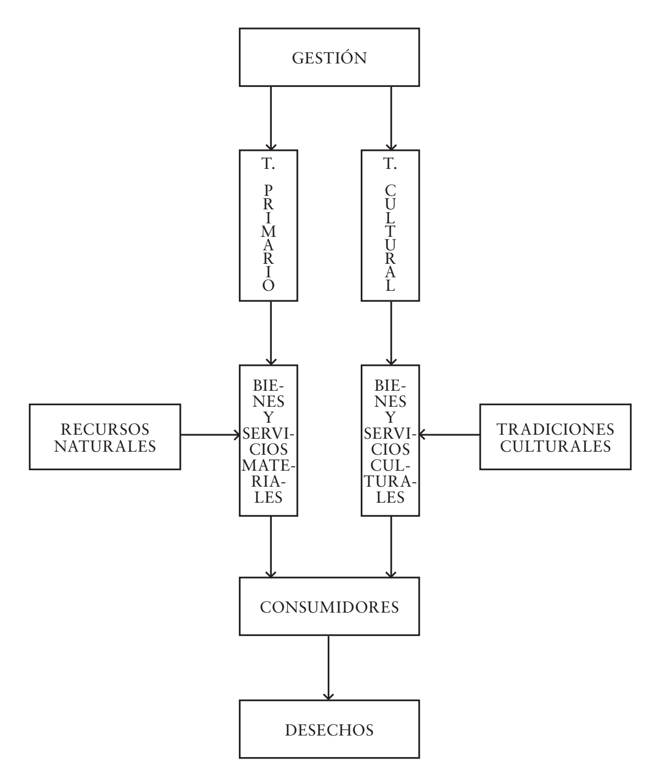


Figura 5.3. Las tres clases principales de trabajo: el trabajo primario, la cultura y la gestión de las anteriores. Los productos del trabajo primario: bienes y servicios materiales. Los productos del trabajo cultural: bienes (por ejemplo, libros) y servicios (por ejemplo, educación) culturales.

(i) el elemento $L_i \in L$, con $1 \leq i \leq r$, se llama i-ésima clase de *trabajo primario* [*labor*], realizado por los miembros de σ, sii L_i es una actividad realizada sobre cosas no humanas, cuyo resultado es un conjunto de cosas o un cambio de estado de las cosas, que es valioso para los miembros de σ;

(ii) el dominio de L_i es $(\mathscr{C}(\sigma))^p \times (\mathscr{E}(\sigma))^q$, donde $p, q \geq 1$ y el recorrido $A_i \subset \mathscr{E}(\sigma)$ de L_i se llama *producto* de L_i, y cada elemento de A_i se llama *artefacto*;

(iii) la totalidad de los productos [bienes y servicios] del trabajo primario realizado en σ, es decir, $\mathscr{A}(\sigma) = \bigcup_i A_i$, se llama *producción material* de σ, mientras que el complemento $\mathscr{N}(\sigma) = \mathscr{E}(\sigma) - \mathscr{A}(\sigma)$ de $\mathscr{A}(\sigma)$ para el entorno de σ se llama *entorno* [*medio* o *ambiente*] *natural* de σ;

(iv) el subconjunto ${}^1P_i \subset \mathscr{C}(\sigma)$ que pertenece al dominio de la relación de trabajo primario L_i se llama conjunto de *productores primarios* de A_i, o *i*-ésima *mano de obra* de σ;

(v) la unión ${}^1P = \cup_i {}^1P_i$ de productores primarios de σ es la *mano de obra* de σ; o *mano de obra primaria* de σ.

Comentario 1 Nuestra definición incluye no sólo la producción de bienes materiales, sino también la prestación de servicios. *Comentario 2* No queremos decir que todo trabajo primario sea manual: bien puede consistir en controlar maquinaria automatizada. *Comentario 3* Nuestro concepto de trabajo primario no coincide con el concepto estándar de industria primaria: los productores o trabajadores primarios a los que nos acabamos de referir pueden ser cazadores o pescadores, agricultores u obreros industriales, mineros, carpinteros o técnicos. *Comentario 4* Nuestro concepto de artefacto no coincide con el concepto corriente: se trata de un concepto técnico. Así pues, dado que son productos de la selección artificial, las bacterias domésticas, tales como las que se usan para fabricar mantequilla y queso, así como las plantas cultivadas y los animales domésticos son artefactos en nuestro sentido del término. Las máquinas no son más que una clase muy especial de artefactos.

El conjunto $L = \{L_i \mid 1 \leq i \leq r\}$ o clases de trabajo primario no puede ser un conjunto vacío en ninguna sociedad, so pena de extinguirse ésta. Puede suceder que una comunidad subsista durante algún tiempo de botines de alguna clase, pero hasta los botines de guerra más abundantes se agotan después de un tiempo. Además, el conjunto L debe contener más de un miembro, ya que cada clase de trabajo primario «conduce a» otras. Así pues, los árboles se cortan para utilizar la madera para uno o más propósitos (actividades) y no es posible realizar este trabajo de manera eficiente –salvo para los castores– sin hachas ni sierras, las cuales deben ser fabricadas. Resumiremos estos comentarios en el

POSTULADO 5.3 En toda sociedad humana

(i) hay más de una clase de trabajo primario, vale decir, $|L| > 1$;

(ii) hay trabajadores (de forma permanente o temporal, exclusiva o no) en todas las clases de trabajo que se realizan en la sociedad, es decir, $P_i \neq \emptyset$ para todo $1 \leq i \leq r$.

Por último, formularemos la

DEFINICIÓN 5.10 Sea $\mathscr{E}(\sigma) = \mathscr{N}(\sigma) \cup \mathscr{A}(\sigma)$ el entorno inmediato de una sociedad con mano de obra ${}^1P$ y relaciones de trabajo primario en L. Luego, la *fuerza de producción material* de σ es la tripleta $\langle {}^1P, \mathscr{N} \cup \mathscr{A}, L\rangle$.

Si alguna de las coordenadas de esta tripleta estuviese vacía, no habría fuerza de producción material. En particular, una mano de obra inactiva (desempleada) es tan poco eficaz como una provisión inexistente de recursos naturales. Sin embargo, la escasez en éstos puede compensarse con la producción material, gracias al intercambio. Pero alguien, en alguna sociedad, tiene que producir alimentos: la sociedad postagrícola no existe. Asimismo, tampoco existe la sociedad postindustrial, sino sólo las sociedades en las que la mayor parte de la mano de obra se dedica a prestar servicios en lugar de al trabajo agrícola o industrial. Sin trabajo primario no hay sociedad humana.

Pasemos ahora a los restantes componentes de la mano de obra de toda sociedad humana.

2.3. El trabajo cultural y el trabajo de gestión

A continuación caracterizaremos la clase de trabajo que hacen los artistas, los poetas, los compositores, los actores, los intérpretes musicales, los narradores de cuentos, los escritores, los maestros, los académicos, los científicos, los ingenieros y los médicos de todo tipo, sean competentes o no:

DEFINICIÓN 5.11 Sea σ una sociedad con una composición $\mathscr{C}(\sigma)$ y relaciones sociales pertenecientes a S, y llámese $K \subset \mathscr{S}(\sigma)$ a un subconjunto propio de la estructura social de σ. Luego,

(i) el elemento K_j de K, para $1 \leq j \leq s$, se llama j-ésima clase de trabajo *cultural* (o *secundario*) realizado por los miembros de σ sii K_j es una actividad capaz de evocar sentimientos o pensamientos, o de proporcionar ideas que intervengan en la producción primaria de σ;

(ii) el subconjunto ${}^2P_j \subset \mathscr{C}(\sigma)$ que pertenece al dominio de la relación de trabajo cultural K_j se llama j-ésimo conjunto de productores *culturales* (o *secundarios*) de σ;

(iii) la unión ${}^2P = \bigcup_j {}^2P_j$ se llama *mano de obra cultural* (o *secundaria*) de σ.

Comentario 1 Si bien el trabajo cultural tiene como finalidad cambiar el modo de sentir o de pensar de la gente, K y T no son disjuntos. En efecto, todo trabajo cultural supone la transformación de alguna cosa, aunque sólo fuese la del estado del aire de los alrededores. Además, hay obras de arte útiles, tales como las piezas de mobiliario diseñadas de manera artística, así como obras de la ciencia útiles, tales como los instrumentos científicamente controlados. *Comentario 2* Según la cláusula (i) escribir un libro que tal vez sea publicado es realizar una cuota de trabajo cultural; hasta la interpretación de una pieza de «música» *rock* es perpetrar cierto trabajo cultural. No lo son orar, soñar ni practicar la meditación trascendental, que de todos modos es dormir. Asimismo, dibujar el plano de una casa o una máquina, o el molde para un vestido, es realizar trabajo cultural, mientras que dibujar por el puro placer de hacerlo o tararear una melodía no lo son. Para ser cultural, una actividad tiene que ser social o socializable, además de artística o intelectual.

Volveremos al asunto del trabajo cultural en la Sección 3.2. Ahora caracterizaremos las relaciones cuya finalidad es influir en el comportamiento social de forma inmediata, en lugar de hacerlo a través del sutil medio de la cultura:

DEFINICIÓN 5.12 Sea $M \subset S$ un subconjunto de las relaciones sociales de una sociedad humana σ. Luego,

(i) el elemento $M_k \in M$ se llama k-ésima clase de trabajo *de gestión* (*organizativo* o *terciario*) realizado por los miembros de σ sii M_k es una actividad que contribuye a controlar algún trabajo primario o secundario realizado en σ;

(ii) el subconjunto ${}^3P_k \subset \mathscr{C}(\sigma)$ para $k = 1, 2, \ldots, t$, del dominio de la relación de gestión M_k, se llama k-ésimo conjunto de trabajadores *terciarios* (*de gestión* u *organizativos*) de σ;

(iii) la unión ${}^3P = \cup_k {}^3P_k$ se llama *mano de obra de gestión* (o *mano de obra terciaria*) de σ;

(iv) el subconjunto ${}^3P_L$ de P^3 dedicado a controlar la producción primaria de σ se llama *gestión de la producción* de σ; y su complemento ${}^3P_k = {}^3P - {}^3P_L$, *gestión de la cultura* de σ.

En otras palabras, llamamos 'gestión' [o administración] a todas las clases de trabajo cuya finalidad es controlar la producción, sea ésta agrícola o artística, industrial o intelectual. Planificadores, gerentes de fábricas, ejecutivos, miembros de granjas socialistas o consejos fabriles,

líderes comunitarios, jueces, burócratas, censores y, en general, quienes toman y quienes transmiten decisiones de toda clase pertenecen a la gestión tal como la hemos interpretado antes. Además, un único individuo puede pertenecer a dos o más manos de obra, tal como sucede con frecuencia en las sociedades primitivas.

Supondremos el

POSTULADO 5.4 Toda sociedad humana tiene tanto una mano de obra cultural (es decir, ${}^2P \neq \varnothing$) como una mano de obra de gestión (es decir, ${}^3P \neq \varnothing$).

De esta verdad de Perogrullo se sigue que es imposible arreglárselas, so pena de destruir la sociedad, sin mano de obra cultural o de gestión. A lo que debería apuntarse es a maximizar la cooperación armoniosa entre las tres clases de mano de obra, vale decir, a suavizar las tensiones y, en consecuencia, eliminar la necesidad de mantener fuerzas represivas. En particular, en lugar de intentar eliminar de forma quijotesca la gestión, se debe luchar para hacer que ésta funcione en beneficio de la producción material y cultural, no en su propio interés. Esta combinación de gestión y fuerzas productivas existe en los modernos sistemas comerciales, plantas industriales, redes de comunicación, hospitales y escuelas bien gestionadas; en síntesis, en todo sitio en el que haya gente trabajando según los cánones de la tecnología (científica) de avanzada. Estos sociosistemas merecen tener su propio nombre:

DEFINICIÓN 5.13 Un sistema τ es un *tecnosistema* sii

(i) la composición de τ incluye a seres racionales y artefactos;

(ii) el entorno de τ incluye a componentes de una sociedad;

(iii) la estructura de τ incluye la producción, mantenimiento o utilización de artefactos.

Una vivienda estadounidense moderna llena de artilugios tecnológicos no cumple las condiciones para ser un tecnosistema, a menos que sea el hogar de una familia en la que el trabajo intelectual desempeña un papel significativo. En cambio, un sistema de defensa moderno sí es un tecnosistema, puesto que se supone que como parte de sus tareas los expertos militares realizan un poco de trabajo intelectual.

La composición o población de toda sociedad humana se compone de una parte activa –quienes realizan trabajo de alguna clase– y otra inactiva. Todas las personas –amas de casa, pastores, pescado-

res, cazadores, artesanos, obreros industriales, trabajadores de cuello blanco, médicos, ingenieros, poetas, músicos, filósofos, etc.– que participan en la transformación de materias primas en artefactos, que realizan trabajo artístico o intelectual, o participan en la organización de la producción material o cultural de bienes y servicios, componen la población activa o recursos humanos. En pocas palabras, tenemos la

DEFINICIÓN 5.14 Sea σ una sociedad humana. Luego,

(i) la *población activa* (o *recursos humanos*) de σ es la unión de sus manos de obra: $A = {}^1P \cup {}^2P \cup {}^3P$;

(ii) la *población inactiva* de σ es el complemento de A respecto de la composición de σ, vale decir, $I = \mathscr{C}(\sigma) - A$.

2.4. Los principales subsistemas de una sociedad humana

Ni la población activa ni la inactiva constituyen sistemas; tampoco lo son los subconjuntos ${}^1P$, ${}^2P$ y ${}^3P$. Por consiguiente, la mano de obra de gestión de una sociedad no es un sistema: los administradores son componentes o bien del sistema económico, o bien del cultural o del político de una sociedad. Cada uno de estos sistemas extrae sus componentes de las restantes manos de obra: véase la Figura 5.4. Así pues, la industria, el comercio y el Gobierno emplean artistas, intelectuales y profesionales de diferentes extracciones; y tanto los trabajadores manuales como los de gestión participan como auxiliares de la producción cultural y de la gestión política. Tenemos, pues, la división

$${}^iP = {}^iP_L \cup {}^iP_K \cup {}^iP_G, \qquad \text{para} \qquad i = 1, 2, 3$$

de cada mano de obra en una parte que participa de la producción primaria, otra que participa en la producción cultural y otra que lo hace en el control político. Mientras que el superíndice *i* identifica la salida (producto) específica del sector, los subíndices simbolizan sus diferentes entradas (insumos).

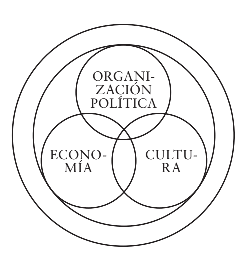


Figura 5.4. Los principales subsistemas de toda sociedad. Círculo exterior: totalidad de la sociedad. Círculo concéntrico interior: sistema de parentesco. Círculos excéntricos: *economía* (recolección, caza, pesca, fabricación, comercio, finanzas), *cultura* (creación y difusión artística, tecnológica, científica y humanística) y *organización política* (Gobierno de todas clases, actividades políticas no gubernamentales, militares). Los solapamientos sugieren que algunas personas participan en dos y hasta en los tres subsistemas. Por ejemplo, un científico pertenece al sistema cultural en virtud de su investigación y docencia, al sistema económico si escribe libros de texto y al sistema político si actúa como asesor del Gobierno.

En consecuencia, distinguimos ciertos subconjuntos de la colección S de relaciones sociales: llamamos S_L, S_K y S_G respectivamente a las relaciones sociales asociadas a la producción primaria, la producción cultural y la gestión política. Por último, agruparemos de modo parecido las relaciones de trabajo: llamaremos L_K y L_G respectivamente a las clases de trabajo primario realizadas en la producción cultural y en el gobierno por los miembros de la mano de obra; K_L y K_G las clases de mano de obra cultural que participan en la producción primaria y en la política respectivamente, y M_L, M_K y M_G las clases de gestión involucradas en la producción primaria, la producción cultural y la política respectivamente. Ahora estamos en condiciones de proponer la

DEFINICIÓN 5.15 Sea σ una sociedad con una mano de obra primaria ${}^1P$, otra cultural ${}^2P$ y otra de gestión ${}^3P$. Además, sean los subíndices L, K y G que identifican todo lo que está asociado con la producción primaria, la producción cultural y la gestión política respectivamente. Luego,

(i) el subsistema de σ representado por

$$\varepsilon_\sigma = \langle {}^1P_L \cup {}^2P_L \cup {}^3P_L, \mathscr{E}(\sigma), S_L \cup (L \cup K_L \cup M_L) \rangle$$

es la *economía* (o *sistema económico*) de σ;

(ii) el subsistema de σ representado por

$$\kappa_\sigma = \langle {}^1P_K \cup {}^2P_K \cup {}^3P_K, \mathscr{E}(\sigma), S_K \cup (L_K \cup K \cup M_K) \rangle$$

es la *cultura* (o *sistema cultural*) de σ;

(iii) el subsistema de σ representado por

$$\pi_\sigma = \langle {}^1P_G \cup {}^2P_G \cup {}^3P_G, \mathscr{E}(\sigma), S_G \cup (L_G \cup K_G \cup M_G) \rangle$$

es la *organización política* (o *sistema político*) de σ;

(iv) ε_σ, κ_σ , y π_σ son los subsistemas *artificiales* principales de σ.

La definición anterior nos permite reformular el Postulado 4.26 de una forma más completa:

POSTULADO 5.5 (i) Toda sociedad humana está compuesta por cuatro subsistemas: el de parentesco, el económico, el cultural y el político; (ii) todo sociosistema de una sociedad humana es parte de al menos uno de sus cuatro subsistemas principales; (iii) todo individuo de una sociedad pertenece a la composición de al menos uno de los cuatro subsistemas principales de la sociedad.

Comentario 1 Al concebir la economía, la cultura y la organización política como sistemas, se evitan las estériles filosofías del holismo y el individualismo. Por la misma razón, se puede modelizar toda la economía (la cultura o la organización política, según sea el caso) de una sociedad como un sistema con composición y estructura determinadas, siempre que se incluyan en ésta los vínculos de la economía (o de la cultura o de la organización política) con los otros subsistemas. *Comentario 2* Los tres subsistemas artificiales comparten el mismo entorno natural y artificial; en particular, ninguna cultura ni organización política puede funcionar en un vacío físico. Por consiguiente, el internalismo extremo (por ejemplo, el idealismo cultural) es tan poco adecuado como el externalismo extremo (por ejemplo, el determinismo ecológico o geográfico). *Comentario 3* Cada mano de obra se distribuye entre los tres subsistemas artificiales. En particular, ni siquiera la economía más primitiva deja de utilizar algunos trabajadores culturales y gestores –aun cuando sean, a la vez, productores primarios– y ni siquiera los sistemas políticos más opuestos a los intelectuales prescinden del todo de éstos, por ejem-

plo, como planificadores y censores. *Comentario 4* Un único individuo puede pertenecer a más de uno de los subsistemas principales, pero es imposible que no pertenezca, por lo menos, a uno de ellos: la marginalidad total en una sociedad es imposible. *Comentario 5* Un cambio significativo en cualquiera de las tres coordenadas de cada subsistema (composición, entorno, estructura) afectará al sistema como totalidad. Ejemplos: un aumento, o una disminución, del porcentaje de trabajadores cualificados o de intelectuales; un aumento o descenso del consumo de energía per cápita. Cuando el cambio es tanto drástico como rápido, se llama *crisis*, de crecimiento o de deterioro. *Comentario 6* Puesto que son subsistemas de una sociedad, cada uno de los tres subsistemas artificiales de la misma está vinculado a los otros dos. Estos acoplamientos resultarían imposibles si los sistemas en cuestión (la economía, la cultura y la organización política) fueran conjuntos de individuos (individualismo) o ideas platónicas (holismo idealista). *Comentario 7* Pasar por alto o siquiera minimizar la importancia de cualquiera de los cuatro subsistemas de una sociedad conduce a perspectivas parciales y, por tanto, a doctrinas de acción política erróneas. Lo mismo es verdad acerca de la negación de las interacciones entre los subsistemas.

2.5. Los supersistemas: la nación y el mundo

Concebimos una *nación* como un sistema o, mejor dicho, como un supersistema social, compuesto por todos los sistemas de parentesco, económicos, culturales y políticos que coexisten en un territorio. A diferencia de las ciudades-Estado de la Antigüedad, las naciones modernas están compuestas por diferentes sociedades, cada una de las cuales ocupa una región geográfica dada dentro del territorio nacional (el cual no tiene por qué ser continuo desde el punto de vista geográfico). Cada componente de la sociedad aporta su subsistema de parentesco, económico, cultural y político a la totalidad. Los subsistemas artificiales están acoplados entre sí y forman una economía nacional, un sistema cultural nacional y un sistema político. Ninguno de estos sistemas nacionales tiene por qué ser homogéneo: por el contrario, la variedad conlleva viabilidad. (La ideología según la cual la homogeneidad es el desiderátum supremo se llama *nacionalismo*, el cual exige con especial vehemencia la pureza racial, la homogeneidad –o sea, la pobreza– cultural y la uniformidad política (vale

decir, la dictadura). Si la integración entre las diversas sociedades que componen una nación es débil, la nación consiste únicamente en un nombre, como sucedió con el Sacro Imperio Romano durante la mayor parte del tiempo. Si la integración es demasiado fuerte, la nación queda aislada de otras naciones. Lo mejor es un acoplamiento de intensidad media.

Las relaciones entre o dentro de los tres subsistemas principales de una nación son de las siguientes clases: (*a*) económicas: por ejemplo, el suministro de energía de la sociedad *X* a la sociedad *Y*; (*b*) económico-culturales: por ejemplo, el desarrollo de una nueva variedad de trigo por investigadores científicos; (*c*) económico-políticas: por ejemplo, la presión de un grupo económico a favor de un proyecto de ley que favorece sus intereses; (*d*) culturales: por ejemplo, los préstamos bibliotecarios entre ciudades; (*e*) político-culturales: por ejemplo, el fomento o la obstaculización de la innovación tecnológica por una oficina estatal; (*f*) políticas: por ejemplo, la toma de control de ciertos departamentos estatales por las fuerzas armadas.

Todas estas relaciones son intersistémicas. Con todo, en última instancia, se apoyan en relaciones entre personas en las que éstas desempeñan sus roles sociales. Por consiguiente, cuando analizamos una relación social *S* entre dos subsistemas de una nación, podemos explicar *S*, finalmente, aproximadamente como sigue: el sistema *b* mantiene la relación *S* con el sistema *c* si y sólo si existen un componente individual *x* de *b* y otro componente individual *y* perteneciente a *c*, tal que *x* mantiene *S* con *y*, donde *S* es un vínculo interpersonal tal como, por ejemplo, el hecho de escribir una carta en la que se pide en préstamo cierto elemento. (Obviamente, los individuos en cuestión pueden ser representados por robots, pero éstos están construidos para actuar según los intereses de su amo, no en el suyo propio). En otras palabras, las relaciones de un supersistema tal como una nación se pueden analizar, por lo menos en principio, en términos de relaciones interpersonales, a condición de que se hayan identificado los roles de las personas involucradas, los cuales no pueden reducirse a propiedades de las personas aisladas. Si se ignoran esos roles sociales y las responsabilidades asociadas, vale decir, si se confunden las relaciones sociales con relaciones particulares, puede que el resultado no sea únicamente un análisis defectuoso, sino también el quebrantamiento de la ley. En resumen, si bien en última instancia todos los sistemas sociales están compuestos por individuos, el caso es que éstos participan en relaciones imposibles de entender sin la hipótesis

de que el sistema posee propiedades supraindividuales. (Recuérdese la Definición 5.2).

Los economistas, los sociólogos, los politólogos y los historiadores sociales están cada vez más interesados en bloques regionales íntegros y en sistemas internacionales, con lo cual se admite que, con frecuencia, la nación es un subsistema, o bien un supersistema y, en ambos casos, una unidad de estudio poco adecuada. (El paradigma de la historia social es la obra de Braudel, *La Méditerranée* [*El Mediterráneo*] (1949). Una reciente adición al enfoque sistémico es la obra de Wallerstein, *The Modern World-System* [*El sistema mundial moderno*] (1974)). En efecto, ya no quedan naciones aisladas, si es que las hubo alguna vez. Todas las naciones modernas mantienen relaciones económicas, culturales o políticas con las demás naciones, relaciones que se dan en cuatro niveles: persona a persona, subsistema a subsistema, nación a nación y organización internacional a organización internacional. (Huelga decir que todas las relaciones entre sistemas están diseñadas y son mantenidas por individuos. Sin embargo, a menudo estos individuos pueden ser reemplazados por otros que desempeñen los mismos roles o funciones. Esto no quiere decir que sus personalidades carezcan de importancia; sólo que éstas desempeñan, bien o mal, sus roles o funciones). A continuación echaremos un vistazo a las relaciones internacionales. (Cf. Deutsch, 1968; Fritsch, 1974; Bunge y otros, 1977).

Además de las cerca de 150 naciones, existen actualmente alrededor de 10.000 organizaciones internacionales. Éstas incluyen (*a*) las organizaciones gubernamentales internacionales, tales como la Organización Mundial de la Salud; (*b*) las organizaciones no gubernamentales internacionales, tales como la Unión Internacional de Historia y Filosofía de la Ciencia y (*c*) las empresas multinacionales, tales como General Motors. Puesto que todos los demás sistemas sociales son subsistemas de una organización internacional, o bien están estrechamente relacionados con alguno(s) de ellos, sería utópico planificar cualquier cosa a escala nacional sin tener en cuenta el contexto internacional. Este contexto es el *sistema internacional*, compuesto por todas las naciones y todas las organizaciones internacionales; su entorno es nada menos que la biosfera y su estructura es el conjunto de relaciones (económicas, culturales, políticas, económico-políticas, político-culturales, etc.) que tienen lugar entre sus diversos componentes. Estas relaciones son bastante enredadas. Por ejemplo, la nación *A* comercia con la nación *B* y tiene estrechos lazos

políticos con la nación *C*, rival de *B*; por consiguiente, las relaciones comerciales son afectadas por las políticas y viceversa. Los politólogos tienden a afirmar que éste es un caso de relaciones entre relaciones o transrrelaciones. Dado que esta noción es vaga, preferimos analizar los mismos hechos utilizando el marco sistémico, a saber, como sigue.

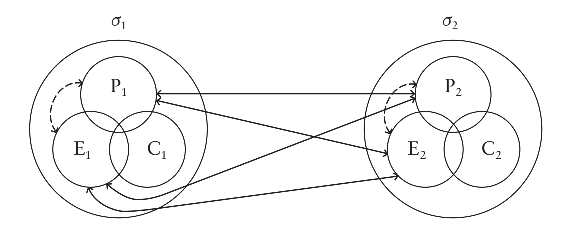


Figura 5.5. Ejemplo de relaciones internacionales económicas y políticas entre dos naciones σ_1 y σ_2. Adviértanse las dos relaciones nacionales, además de las cuatro internacionales: las primeras se indican mediante líneas punteadas.

Todo actor internacional (nación, organización intergubernamental, empresa multinacional, etc.) posee tres subsistemas principales, cada uno de los cuales puede interaccionar con cualesquiera de los otros dos. Véase la Figura 5.5. Al completar este diagrama advertimos que dos miembros del sistema internacional pueden participar en 9 *conjuntos* de relaciones binarias, a saber: $E_1 - E_2$, $E_1 - C_2$, $E_1 - P_2$, $C_1 - E_2$, $C_1 - C_2$, $C_1 - P_2$, $P_1 - E_2$, $P_1 - C_2$, $P_1 - P_2$. Para *n* miembros del supersistema, el número total de conjuntos de relaciones internacionales binarias es $N = (9/2)n \cdot (n - 1)$. Para todo el sistema internacional en la actualidad, $n \cong 10.000$, de donde resultan $N \cong 450$ millones de conjuntos de relaciones internacionales. (El número calculado basándonos en el supuesto de las fantasmales relaciones entre relaciones es mucho más abrumador, del orden de los 10^{15}, o siete órdenes de magnitud mayor que el nuestro). Se trata de una cifra imponente y, con todo, resulta modesta en comparación con el número de relaciones entre pares de átomos que hay en un anillo de bodas, unas 10^{38}. Los politólogos pueden rodear este obstáculo del mismo modo que lo hacen los físicos, a saber, tomando en cuenta únicamente las relaciones entre los vecinos más cercanos. De esta forma surgen bloques y, entonces, se puede estudiar las relaciones entre bloques del mismo modo que se analiza cualquier otro supersistema: dividiéndolo en subsistemas de niveles

inferiores. Este análisis de sistemas crea la posibilidad de construir modelos teóricos (matemáticos) que incluyan relaciones funcionales precisas entre las variables. (Cf. Bunge, 1977h).

Aquí damos por terminado nuestro estudio preliminar de los principales subsistemas y supersistemas de la sociedad humana. A continuación estudiaremos con mayor detalle los tres subsistemas artificiales de toda sociedad.

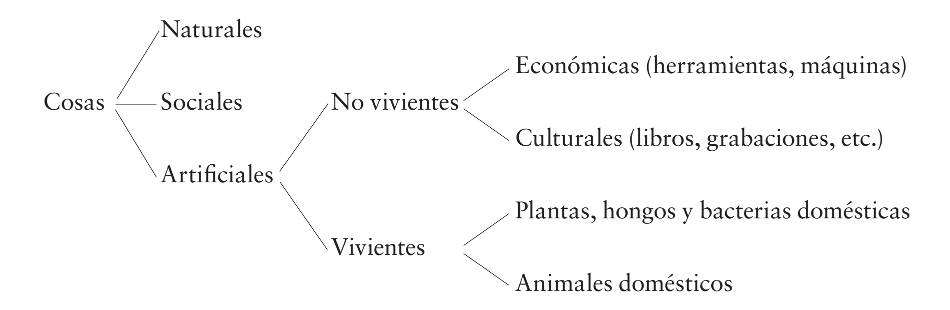
3. Economía, cultura y organización política

3.1. El sistema económico

Según la Definición 5.15, el sistema económico de una sociedad está compuesto por sus trabajadores primarios (${}^{1}P_L$), trabajadores culturales (${}^{2}P_L$) y trabajadores administrativos (${}^{3}P_L$). Los trabajadores primarios participan en la producción primaria (L), los trabajadores culturales tienen a su cargo los insumos culturales de la producción primaria (K_L) y los trabajadores administrativos organizan a ambos (M_L). Así pues, los maquinistas, electricistas, conductores de camiones y obreros de mantenimiento de una planta industrial pertenecen a ${}^{1}P_L$; los ingenieros, controladores de calidad y delineantes a ${}^{2}P_L$; los ejecutivos, contadores y mecanógrafos a (${}^{3}P_L$); los capataces pertenecen, con frecuencia, a los tres conjuntos, pero su función específica la desempeñan como miembros de ${}^{3}P_L$. Todos estos trabajadores comparten el mismo entorno y mantienen las mismas relaciones (de producción) S_L entre sí, además de cualesquiera otras relaciones que pudieran mantener. El esquema de entradas y salidas (insumos y productos) de un sistema económico se muestra en la Figura 5.6.

De todos los aspectos del sistema económico, es posible que los de mayor interés filosófico sean la tecnología y los artefactos que ésta produce y utiliza. Los dos suscitan numerosos problemas filosóficos de toda clase que apenas han sido investigados (cf. Bunge, 1977g). Digamos un par de palabras sobre los artefactos, vale decir, las cosas moldeadas por seres racionales mediante una técnica, sea ésta primitiva o avanzada. Un artefacto no es sólo una cosa más, sino una cosa que pertenece a una clase que no existía antes de la emergencia del hombre u otro ser racional. Podemos considerar que los artefactos constituyen un nuevo

nivel de realidad: la *artifisis*. Ahora podemos clasificar el conjunto de todas las cosas concretas como sigue:



Lejos de ser entidades despreciables de las cuales los filósofos no se dignan hablar, los artefactos se encuentran en el centro de la sociedad humana y poseen propiedades de las cuales carecen las cosas naturales. Para comprenderlo puede servir de ayuda recordar los diferentes elementos que intervienen en la producción, el mantenimiento, la reparación, el uso y la circulación de los artefactos. Se trata, principalmente, de los siguientes: (*a*) la idea o diseño de los artefactos; (*b*) la idea de su(s) posible(s) uso(s); (*c*) un plan o diseño para la manufactura del artefacto; (*d*) la materia prima y la energía necesarias para producir el artefacto; (*e*) el proceso de producción real; (*f*) la comercialización del producto final; (*g*) el control de todo el proceso. De estos siete ingredientes, la naturaleza sólo proporciona uno: el cuarto. Dado que todos los restantes están, en última instancia, en las manos o los cerebros de la gente, la artifisis está completamente a su merced. Los seres humanos, o unos animales sociales semejantes a ellos, pueden crearla, así como destruirla. Los artefactos no tienen voluntad propia ni, por cierto, existencia propia: hasta los artefactos más complejos no son otra cosa que herramientas. Además, la tecnología tampoco tiene autonomía: sólo se la cultiva en las sociedades que se preocupan por ella. Una pandilla de *tecnoclastas* podría asesinar a todos los tecnólogos y destruir todos los artefactos del planeta en unos cuantos días. Por consiguiente, afirmar que la tecnología y el conjunto de los artefactos posee una vida y un impulso propios, que no se los puede detener, es, como mínimo, extravagante.

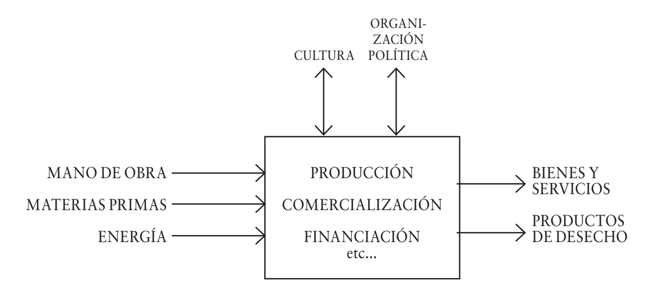


Figura 5.6. Esquema del sistema económico. Insumos: recursos naturales (materias primas y energía) y recursos humanos. Productos: bienes, servicios y productos de desecho. Algunos de los productos van a realimentar el sistema (por ejemplo, las herramientas). Controles: la cultura (principalmente técnicas y tecnología de punta) y la política.

Resumiremos lo dicho en el

POSTULADO 5.6 (i) Toda sociedad humana posee miembros capaces de diseñar, fabricar, reparar y utilizar artefactos; (ii) todo artefacto no viviente [herramienta o máquina] vale, únicamente, para las finalidades de un animal.

De ello se deduce que ninguna máquina, ni siquiera un robot altamente desarrollado, posee fines propios: sea cual fuere el mecanismo de persecución de fines del que hayan sido dotadas, han sido diseñadas y construidas por seres racionales en beneficio de los intereses de éstos. Por consiguiente, las máquinas no tienen ninguna oportunidad de tomar el mando, a menos, por supuesto, que hayan sido programadas para hacerlo. De ello se sigue que cuando un artefacto no viviente imita ciertos aspectos de los animales racionales, lo hace de forma indirecta, no espontáneamente. Otra consecuencia de lo anterior es que los artefactos no pueden ni evaluar ni pensar por sí mismos. Que no hacen valoraciones resulta obvio, ya que no poseen finalidades aparte de las que sus diseñadores les han incorporado. (Esta capacidad de evaluación indirecta puede estar en el *hardware*, como cuando se ha construido la máquina para buscar o evitar ciertos estímulos, o bien para clasificarlos; o puede estar en el *software*, como cuando la máquina está programada para pesar manzanas o evaluar diferentes rutas de entrega del correo. En ambos casos, la evaluación delegada puede desencadenar una decisión

indirecta; por ejemplo, la de descartar una manzana cuyo peso es menor al previsto o una ruta inconveniente. Cuando se refiere a las «capacidades indirectas de las máquinas», el tecnólogo subraya “capacidades”, mientras que el filósofo pone el énfasis en “indirectas”, a menos, por supuesto, que acepte la palabra del primero).

En lo que respecta a nuestra afirmación de que las máquinas no pueden pensar, resulta bastante evidente a la luz de nuestra concepción psicobiológica del pensamiento como una actividad de ciertos sistemas neurales (Definición 4.35). Otra vez, las máquinas, a diferencia de los seres racionales, no tienen finalidades –en particular, no poseen finalidades cognitivas– propias, de suerte tal que se puede decir con toda corrección que actúan de forma vicaria. No cabe duda de que las máquinas pueden ayudarnos a resolver ciertos problemas, pero no pueden descubrir ninguno, a causa de que la formulación de un problema no constituye una actividad guiada por reglas y mientras no conozcamos una regla, no podemos diseñar o programar un ordenador que siga esa regla. (Éste es también el motivo de que no pueda haber máquinas autoprogramadas: si una máquina tuviera sus propios problemas la desmontaríamos rápidamente). Además, se puede utilizar las máquinas para procesar los supuestos de ciertas teorías, pero no contribuyen a crearlas y ello por la misma razón: porque el desarrollo de teorías no es una actividad dirigida por reglas, sino una actividad completamente creativa. En resumidas cuentas, las herramientas, independientemente de cuán maravillosas sean, no son más que herramientas.

3.2. El sistema cultural

En la Definición 5.15 caracterizamos el sistema cultural de una sociedad y afirmamos que no sólo está compuesto por trabajadores culturales (^2P_K) sino también por trabajadores primarios (^1P_K) y gestores (^3P_K). Los primeros, desde luego, se encargan de la producción cultural (K), mientras que los otros dos grupos los acompañan como auxiliares, como en el caso de los empleados de mantenimiento de una universidad, o como organizadores, como en el caso de quienes administran una universidad. Otro ejemplo: los técnicos y mecanógrafos que trabajan para un biólogo experimental pertenecen a ^1P_K, mientras que el director del laboratorio científico pertenece a ^3P_K y, en ocasiones, también a ^2P_K.

Todos los miembros de un sistema cultural comparten el mismo entorno y están vinculados por ciertas relaciones S_K. Pero no todos los ingredientes de un sistema cultural están en pie de igualdad. Sus ejes centrales son: (*a*) los trabajadores que participan directamente en proyectos culturales, vale decir ^2P_K; (*b*) la parte del entorno natural o social que es objeto de contemplación, estudio o acción racional; (*c*) la parte de las existencias de artefactos compuesta por artefactos culturales, tales como pinturas, libros, microscopios y cosas por el estilo; y (*d*) el trabajo cultural propiamente dicho, por ejemplo, la investigación, la escritura o la enseñanza.

El nuestro es un concepto restringido de sistema cultural. Un concepto más amplio incluye a toda la mano de obra cultural, no sólo a quienes realizan trabajo a favor de la cultura sino también a quienes participan como auxiliares, mediante los sistemas económico y político, tales como los técnicos de una unidad de control de calidad o los sociólogos de una oficina censal. Sin embargo, este supersistema cultural está vinculado o integrado de forma mucho menos estrecha. Así pues, el ingeniero químico que trabaja en una refinería de petróleo está mucho más apegado al sistema económico que al cultural en sentido estricto, a menos, por supuesto, que se trate de un químico que realice investigación, en cuyo caso pertenecerá tanto al sistema cultural como al económico y puede, en consecuencia, sufrir un conflicto de lealtades. En ambos casos, el esquema de entradas y salidas [insumos y productos] del sistema cultural se bosqueja en la Figura 5.7.

Este esquema también sirve de recordatorio de que, tanto en la interpretación estrecha como en la amplia, un sistema cultural es un *sistema concreto*, no sólo «un cuerpo de significados, valores y reglas». Más precisamente, una cultura es un sistema concreto compuesto por seres vivientes racionales que participan en actividades de diversas clases, algunas de las cuales trascienden la llamada de la necesidad biológica, y todas las cuales son sociales, porque se basan en la tradición e influyen en el comportamiento social. Vale decir, la creación y la difusión de la cultura son procesos sociales, moldeados por la sociedad, que a la vez tienen influencia sobre la economía y la organización política.

Nuestro concepto de cultura como sistema concreto discrepa de la noción idealista de un sistema incorpóreo de ideas, valores y reglas, que es el concepto preferido por la mayoría de los antropólogos. En realidad, esta otra noción corresponde a un *tipo* de cultura, más que a una cultura en particular. Por consiguiente, allí donde un sistema cultural

(en nuestro sentido) incluye ciertas acciones, tales como las de escribir e inventar, una cultura, en el sentido antropológico del término, sólo incluye las pautas de tales acciones, por ejemplo, las reglas que, se supone, regulan esas acciones. Nuestro concepto de cultura tampoco coincide con el de una superestructura ideal –compuesta por ideas, valores y normas– a caballo de la estructura material (la economía y la organización política). A diferencia de estos conceptos dualistas de cultura, el nuestro es monista.

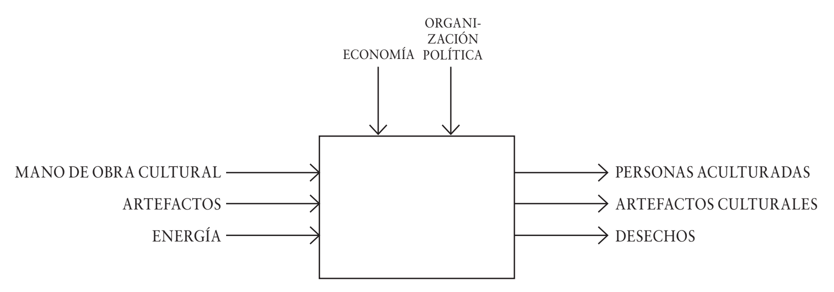


Figura 5.7. Modelo de insumos y productos del sistema cultural. Insumos: mano de obra (central y auxiliar), artefactos (pintura, pinceles, papel, lápices, libros, ficheros, etc.) y energía (luz, calor, etc.). Productos: artefactos culturales (partituras musicales, esculturas, publicaciones periódicas, etc.), personas transformadas por los anteriores y productos de desecho. Algunos de los productos van a realimentar el sistema. Controles: la economía y la política.

Los sistemas culturales de las sociedades primitivas son, cuando menos, tan monolíticos como sus sistemas económicos y políticos, en el sentido de que no están compuestos por subsistemas. La emergencia de la civilización estuvo acompañada por una explosión de la división del trabajo, en particular del trabajo cultural. Al chamán único le sucedió una cohorte de sanadores, sacerdotes, bardos, maestros, pintores y, más tarde, de artesanos cualificados y hasta de escribas. Asimismo, el sistema cultural se dividió en varios subsistemas o subculturas: el sistema religioso (organizado alrededor de los templos), el sistema educativo (organizado en torno a las escuelas), etc. Estas diferentes subculturas se complementan entre sí en ciertos aspectos, pero discrepan entre sí en otros, aunque sólo fuese porque todas ellas compiten por un número finito de personas, así como por una cantidad finita de recursos materiales. En todo caso, las subculturas interaccionan. Las acciones mutuas

que tienen lugar entre los principales subsistemas de la cultura contemporánea se muestran en la Figura 5.8.

Tanto el mecanismo interno de cada subsistema cultural como sus interacciones con los demás miembros del sistema cultural impulsan los cambios de éste, independientemente de cuán ligeros y lentos puedan ser. Los sucesivos estados de un sistema cultural constituyen la *evolución* (o *historia*) *cultural* de la sociedad en cuestión. La evolución cultural modula la evolución biológica y ambas acontecen mediante un proceso de selección. Pero a diferencia de la evolución biológica, la evolución cultural no carece de finalidad. La innovación y difusión cultural, sea ésta técnica o artística, científica o ideológica, es en parte aleatoria y en parte deliberada.

Una cultura floreciente es una cultura rebosante de novedad –novedades valiosas, no meras extravagancias– y posee la libertad de desarrollarla sin demasiada interferencia de los sistemas económico y político. Una cultura decadente es una cultura que ha dejado de valorar el descubrimiento y la invención, y se refugia en letanías o en la evasión de la realidad. La administración de un sistema cultural –la política de la cultura– puede fomentar la creatividad, encauzarla o cortar de raíz cada brote creativo. Una cultura muerta sigue siendo una cultura, una que puede permanecer en ese estado durante un largo período de tiempo. Pero a causa de las relaciones funcionales entre los tres principales subsistemas artificiales de toda sociedad, cada cambio de envergadura en la economía o la organización política tendrá, con seguridad, repercusiones culturales.

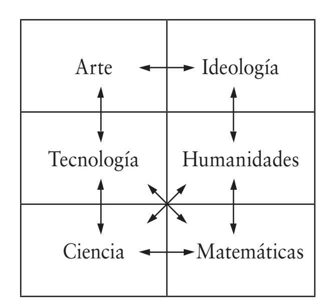


Figura 5.8. El sistema cultural contemporáneo y sus subsistemas. Cada caja representa tanto la creación como la difusión. Las flechas representan tanto flujos de información como controles. El arte y la ideología, cuyas composiciones son las más numerosas en las sociedades tradicionales, tienen la menor cantidad de vínculos informativos con las restantes subculturas. (Tomado de Bunge, 1977g).

Por consiguiente, el sistema cultural coevoluciona con los sistemas económico y político. Sin embargo, los modos de evolución de estos subsistemas pueden ser muy diferentes entre sí y ninguno de ellos es, simplemente, la imagen del otro. En consecuencia, el crecimiento cultural es compatible con el crecimiento económico nulo y el estancamiento político, a condición de que el sistema político no interfiera de forma destructiva con la evolución cultural. Además, mientras que el desarrollo económico está limitado por los recursos naturales, el crecimiento cultural no tiene esos límites: cuanto más sabemos, más problemas nuevos podemos plantear y resolver.

Con todo, la evolución cultural experimenta, desde luego, restricciones económicas y políticas. Para empezar, toda sociedad dada puede contener un número determinado de, por ejemplo, compositores, matemáticos y filósofos profesionales. Pero al menos aquí, a diferencia de la economía, hay una solución a la vista, a saber, la automatización y el desarrollo no profesional de los intereses culturales. De hecho, la primera ya está liberando muchas manos y muchos cerebros del trabajo rutinario, y una sociedad buena debería convertir esta libertad añadida en ocio y creación en lugar de desempleo. Una revaloración de la cultura debería alentar a la gente a participar en el trabajo cultural por el placer de hacerlo, no como la fuente de ingresos primaria. Todo el mundo debería poder dominar cualquier habilidad cultural que deseara y practicarla durante las cada vez más largas horas de ocio que la automatización hiciera posibles. Esto no tendría por qué fomentar la producción cultural de baja calidad. Por el contrario, lo que está reduciendo la calidad del trabajo cultural es la sustitución, cada vez más acentuada, de la motivación intrínseca por la motivación extrínseca (la paga, la promoción, la fama). (Para los efectos negativos de las recompensas externas en los niños véase Lepper y otros, 1973).

Para concluir: nuestra concepción de la cultura difiere de la del idealismo («El espíritu es la fuerza que nos mueve»), así como de la propia del economicismo («La cultura no es más que un producto secundario de la economía»). Si toda cultura es un subsistema de una sociedad, entonces posee una dinámica propia y, por consiguiente, cierto grado de independencia, además de lo cual interacciona con los restantes subsistemas, a saber, la economía y la organización política. En consecuencia, la cultura no es completamente libre y omnipotente, ni es una esclava impotente. Así como ciertos miembros del sistema económico ejercen

poder económico y ciertos miembros del sistema político esgrimen poder político, algunos miembros del sistema cultural ejercen poder cultural, especialmente si están insertos en determinados subsistemas culturales, sean éstos privados o estatales. Por ejemplo, el sistema educativo de una comunidad ejerce cierta influencia sobre todos los habitantes de la misma; con frecuencia, esta influencia es tan intensa como la que en el pasado ejercía la religión organizada. Semejante influencia no está restringida a los asuntos puramente culturales. Una organización cultural creativa puede estudiar, analizar y hasta proponer y difundir planes de acción económica y política. Tales propuestas no equivalen a la acción, pero pueden suscitarla y orientarla. Después de todo, hay individuos pensantes que impulsan a la gente todo el tiempo. ¿Por qué dejar que ciertas ideologías obsoletas acaparen ese papel si es posible diseñar planes racionales y factibles, vale decir, fundar la acción social en las ciencias sociales?

3.3. El sistema político

El sistema político de una sociedad es el subsistema de ésta que controla (en cierta medida) el trabajo económico y cultural, así como otros tipos de comportamiento social. Quienes ejercen ese control –en provecho de unos pocos o de la mayoría, de forma arbitraria o de acuerdo con las normas– son, en última instancia, ciertos individuos (dirigentes políticos y burócratas). No existe nada parecido al «gobierno de las leyes, no de los hombres», el sustituto moderno de la ficción del gobierno en nombre de la deidad.

Dado que ciertas decisiones políticas afectan incluso a los niños, se podría pensar que la totalidad de la población de una sociedad compone su cuerpo político. Sin embargo, por razones prácticas, resulta conveniente limitar la composición del sistema político a sus actores, o miembros activos, a saber, los ciudadanos que tienen derechos y responsabilidades políticas: todos los demás son políticamente marginales o pasivos. La estructura de un sistema político es, desde luego, el conjunto de relaciones sociales que se establecen entre los actores políticos y que ejercen el control político. Todo *régimen* político (por ejemplo, la democracia parlamentaria) está caracterizado por ciertos tipos de relaciones políticas.

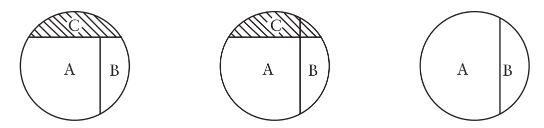
El sistema político de una sociedad moderna, a diferencia del de una sociedad primitiva, posee un subsistema destacado, a saber, el *Estado* o *Gobierno*. A su vez, el Estado de una sociedad desarrollada se puede dividir en varios subsistemas, tales como el sistema de defensa, el sistema de salud, el sistema educativo, etc. Algunos de estos subsistemas constituyen un núcleo relativamente estable («técnico», «apolítico», «no ideológico») que se mantiene prácticamente inalterado ante los cambios de la dirigencia política. Para bien o para mal, muchos de estos subsistemas gubernamentales crecen y se fortalecen hasta el extremo de escapar a casi toda forma de control. Si posee fuerza física, como en el caso del ejército o la policía, puede acabar controlando a todo el sistema político y, a través de éste, a toda la sociedad.

Las diferencias entre los regímenes políticos son diferencias de distribución del poder político, es decir, diferencias de participación en la acción política. Consideremos una comunidad formada por tres grupos sociales, que llamaremos A, B y C. Supongamos, además, que A y B son mutuamente disjuntos y que C es el grupo que ejerce el control político. Más aún, todos los miembros de C poseen control real: no pueden ser vencidos en una votación en ningún asunto de importancia. En estas circunstancias, hay exactamente tres posibilidades: véase la Figura 5.9. El círculo de la izquierda ilustra el caso del Gobierno aristocrático (teocrático), en el cual la clase que ejerce el control no se mezcla con los demás grupos. El círculo del medio ilustra las diferentes clases de democracia (representativa, participativa, etc.). El círculo de la derecha ilustra la anarquía: no hay ningún control propiamente dicho. El grado, o la medida, de la participación de los miembros de A y B en C es, según el caso

$$\alpha = |A \cap C|/|C|, \qquad \beta = |B \cap C|/|C|.$$

Además de estas medidas objetivas del control político, los politólogos se interesan por el modo en que la gente «percibe» el sistema político. O sea, la política no es sólo una cuestión de estructura política y poder objetivos, sino también de psicología social. Esto ya lo vio el fundador de la ciencia política, en particular cuando hacía notar que las rebeliones eran causadas o bien por el deseo de igualdad, o bien por el deseo de superioridad (Aristóteles, *Política*, Libro V, Capítulo 2). Asimismo, Marx hizo hincapié en la diferencia entre las condiciones objetivas y subjetivas

para una revolución. Echemos un rápido vistazo a dos conceptos clave de psicología política: los de adhesión y sentimiento de injusticia.



Participación nula	*Participación parcial*	*Participación total*
Ningún A ni B participa en C:	Algunos A y B participan en C:	Todos los A y los B participan en C:
$A \cap C = B \cap C = \varnothing$	$A \cap C \subset A, B \cap C \subset B$	$C = A \cup B$
$\alpha = \beta = 0$.	$0 < \alpha, \beta < 1$.	$\alpha + \beta = 1$.

Figura 5.9. Tres formas de participación política (o régimen político).

El que una sociedad sea más o menos cohesiva reviste menos importancia para su «supervivencia» que el modo en que esa cohesión es «percibida». Es posible que un tejido social con una baja cohesión real sea «visto» como uno altamente cohesivo (a causa, por ejemplo, de la represión del disenso) y viceversa: es posible que una sociedad con una elevada cohesión sea «vista» como una con escasa cohesión (a causa, por ejemplo, de una minoría inconformista muy activa). El concepto clave aquí es el de apego de un individuo hacia un grupo o sistema. Podemos decir que un individuo se siente apegado a un grupo o sistema si cree que los beneficios (materiales, culturales, emocionales, etc.) que obtiene de ese apego son mayores que el precio que debe pagar por el mismo. En otras palabras, la *adhesión* o *apego* de un individuo x a un grupo o sistema dado G_i es $A_i(x) = B_i(x) - C_i(x)$, donde B y C son las funciones de coste y beneficio respectivamente. Hay un apego positivo a G_i si los beneficios superan los costes (vale decir, si $A_i(x) > 0$). De lo contrario, o bien hay rechazo ($A_i(x) < 0$) de G_i por x, o bien indiferencia ($A_i(x) = 0$) de éste hacia G_i. El *apego* o *adhesión total* de un individuo x a una sociedad σ formada por n grupos sociales G_i es

$$A(x) = \sum_{i=1}^{n} A_i(x)$$

y el *apego* o *adhesión de la membresía de* σ a σ es

$$A(\sigma) = \sum_{x \in \mathscr{C}(\sigma)} A(x).$$

Si se escoge un factor de normalización adecuado, se puede hacer que $A(\sigma)$ oscile, por caso, entre –1 y 1. Por ejemplo, las elecciones de 1978 probaron que la adhesión total del pueblo francés a su sociedad es 0 (o ½ en una escala [0, 1]).

Debido a que la adhesión es psicosocial, puede cambiar velozmente con la información, la desinformación y la crítica. Cuando tales medios no consiguen aumentar la adhesión, es inminente un cambio social estructural. Quienes están en el poder pueden hacer frente a una disminución del apego popular en una de dos formas: mediante concesiones, o bien mediante la coerción. La medida en que se ejerza cada una dependerá del desequilibrio entre el valor de adhesión real y el mínimo necesario para que la estructura social se mantenga inalterada.

Nuestro segundo concepto de interés es el de «percepción» de la equidad. El comportamiento político de todo agente político está determinado parcialmente por su «percepción» de la equidad o inequidad de su condición en la sociedad y su valoración del ideal de equidad (o inequidad). El desequilibrio entre las dos contribuirá a su apego o desapego hacia la estructura social dominante. En consecuencia, los científicos sociales no sólo se interesan por la equidad real, sino también por la equidad percibida, la equidad deseada y la equidad deseable o viable. Veamos estos conceptos.

A todo lo que se puede distribuir o adjudicar, desde los bienes y servicios y las horas de ocio hasta la participación política, se le pueden asignar diversos grados de justicia o equidad. Ahora bien, lo que es justo en una sociedad puede resultar injusto en otra. Así pues, mientras que en ciertas sociedades un promedio de 10 años de escolaridad sería justo para todos, en otras constituiría una carga demasiado pesada y, en consecuencia, resultaría injusta para la mayoría. Y en otras, además, 10 años resultarían insuficientes y, por consiguiente, injustos para la mayoría. Esta noción del valor meta de una propiedad (tal como el número de años de escolaridad) debe distinguirse de la noción de valor subjetivamente deseable (o desiderátum). Mientras que ésta puede ser poco realista e incompatible con la justicia, la primera debería ser, en principio, determinable mediante el estudio del estado de desarrollo y los recursos de la sociedad. Llamaremos a

este valor (o distribución, según sea el caso) objetivamente determinable *equidad objetivamente deseable*, a diferencia de los diversos *desiderátums de equidad*.

Podemos suponer que para cada característica o variable existe una medida de equidad o, inversamente, de inequidad. Sea cual fuere la característica en cuestión, la inequidad objetiva es una función f de la diferencia entre el valor real X de la variable y su valor meta G, vale decir, $i(X) = f(X - G)$. *Ejemplo 1* La variable posee un único valor en un instante dado, como en el caso del número medio de años de escolaridad. En este caso, un indicador adecuado de la inequidad es, simplemente, la diferencia entre G y X dividida por el mayor de los dos. *Ejemplo 2* La característica en cuestión es una distribución, tal como la distribución del terreno cultivable entre las familias de una sociedad. Si lo objetivamente deseable es una línea recta (por ejemplo, que el área del terreno sea proporcional al número de las familias), el índice de Gini es una medida adecuada de la inequidad: véase la Figura 5.10. *Ejemplo 3* La distribución meta es simétrica, como en el caso de la distribución de las horas de trabajo frente a la edad. En este caso, la inequidad es igual a la asimetría de la distribución, de la cual hay varias medidas.

La agudeza de la percepción de la inequidad, así como el deseo de equidad, además de depender de la inequidad real, dependen de diversos factores. Uno de ellos es la movilidad social. En una sociedad primitiva, la equidad social se da por sentada, mientras que en una sociedad altamente estratificada la inequidad puede darse sin cuestionamientos por estar consagrada por la ideología. En cambio, allí donde la movilidad social es considerable, muchas personas sienten las diferencias de estatus como algo inicuo y, además, evitable a través de la acción individual, o bien mediante la acción social. Si la primera se muestra ineficaz, ha llegado el momento del disenso y hasta de la sedición. Por consiguiente, podemos adoptar la siguiente versión de la *ley de Aristóteles-de Tocqueville-Marx* la inequidad extrema acaba siendo percibida y negativamente valorada, eso disminuye el apego por la estructura social y esto, a su vez, conduce o bien a la indiferencia, o bien a la rebelión activa; en ambos casos lleva al deterioro del sistema político.

Huelga decir que la inequidad puede ser económica, cultural o política. La inequidad percibida en sólo uno de estos aspectos no es ni necesaria ni suficiente para que un grupo se rebele contra el tejido so-

cial. Todo grupo que se ajuste bien al orden social (económico, cultural y político) dominante, vale decir, que no sea marginal, probablemente será conservador, aun cuando dicho grupo pueda no ser el principal beneficiario de ese orden. Lo que sí parece ser necesario y suficiente para que los miembros de un grupo social se rebelen contra el orden social dominante es (*a*) el sentimiento de ser discriminados de forma negativa en los tres aspectos (económico, cultural y político), (*b*) el sentimiento de indiferencia respecto de las tradiciones que acompañan al orden social en cuestión (es decir, el estado de marginación cultural, no solamente económica o política) y (*c*) la capacidad de autoorganización para formar un sistema.

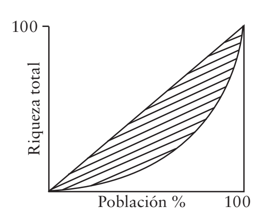


Figura 5.10. Inequidad en la distribución de la riqueza. El índice de Gini es la diferencia entre el área situada debajo de la línea recta (igualdad) y el área situada debajo de la curva real.

Por último, llegamos a la noción de libertad. Existen tantas clases de libertad como clases de comportamiento social. Puesto que las actividades humanas acaecen en alguno de los tres subsistemas artificiales de la sociedad, podemos agrupar las especies de libertad en tres géneros: económica, cultural y política. La libertad de trabajar (u holgazanear) es una libertad económica; la libertad de aprender es una libertad cultural –y lo es, asimismo, la libertad de mantenerse ignorante– y la libertad de participar en la toma de las decisiones que afectan a la comunidad como totalidad es una libertad política. Dados la variedad de las libertades y el hecho de que cada una tiene su opuesta, deberíamos cuidarnos de calificar una sociedad como libre sin más. Deberíamos especificar en qué aspectos, y en qué medida, son libres o no los miembros de una sociedad. Pero esta determinación presupone un concepto exacto de libertad. Intentemos, pues, proporcionar uno, aunque se trate de uno que resulta de interés para la politología, a saber, el de *potestas agendi* o libertad *para* [obrar], en lugar de libertad

frente a ([restricciones tales como] el hambre, el miedo, el frío, etc.).[#] Podemos caracterizar el poder para actuar mediante la

DEFINICIÓN 5.16 Sea A un conjunto de alternativas, cada una de las cuales consiste en participar en una actividad o abstenerse de hacerlo. Además, sea x un miembro arbitrario de una sociedad σ. Luego,

(i) la persona x es *libre* para hacer $y \in A$ en σ sii y es una elección posible para x & x puede realmente hacer y & x valora y & el beneficio que x prevé de la realización de y es mayor que el coste para x de hacer y;

(ii) la sociedad σ es *libre en el aspecto* A sii cada miembro de σ es libre para hacer $y \in A$;

(iii) la sociedad σ es *libre* sii es libre en todos los aspectos, vale decir, si es libre para todo conjunto A de alternativas (opciones).

Nuestra definición de poder o libertad para actuar se basa en las nociones de alternativa u opción, de capacidad o competencia para realizar un acto, de valor, y de coste y beneficio, todas las cuales, presuntamente, han sido dilucidadas por alguna disciplina. Esta definición muestra la dependencia de la libertad de acción con respecto a las leyes y las circunstancias: interpreta que la libertad depende de la determinación (sea ésta causal, estocástica u otra), no de la indeterminación (ni, por consiguiente, de la inexistencia de leyes). En realidad, en un universo ilegal no habría libertad de ninguna clase, ya que, a fin de ejercer la libertad para hacer algo, un agente, debe poder contar con ciertas regularidades, por lo menos aquellas que involucran sus posibilidades, valoraciones y acciones.

Supondremos el muy perogrullesco

POSTULADO 5.7 Toda persona y toda sociedad es libre en algunos aspectos, y ninguna es libre en todos sus aspectos.

Una sociedad completamente libre –vale decir, una sociedad en la que cada persona fuera totalmente libre– sería imposible, porque el ejercicio de las libertades de una persona está limitado por el de las de su vecino. Tampoco sería posible una sociedad totalmente esclavizada, porque todas las personas necesitan ejercer algunas libertades, aunque sólo fuera para sobrevivir y hacer su contribución a la sociedad. Por con-

[#] En el original, *freedom to*, o libertad positiva, y *freedom from*, o libertad negativa, respectivamente. [N. del T.]

siguiente, ni el libertarismo ni el autoritarismo extremos ofrecen planos viables para la construcción de una sociedad duradera; mucho menos para la de una sociedad atractiva.

La cuestión de la libertad personal constituye el núcleo del debate ideológico de nuestra época y, pese a ello, no es posible discutirla con provecho en el plano ideológico. En cambio, la concepción sistémica del sistema político puede echar algo de luz en el debate. Una persona normal es un componente de una sociedad. Para sobrevivir, debe mantener cierto grado de individualidad o autonomía, así como participar en algunas interacciones sinérgicas (coordinadas) con otros componentes del sistema, ya que, de otro modo, éste se descompondría. En efecto, la exageración de la autonomía del individuo conduciría o bien a su separación del sistema, o bien al sometimiento de este último al control tiránico del primero a expensas de la libertad de sus demás componentes. Y el exceso de énfasis en la sinergia de la totalidad puede conducir a la privación de la creatividad de sus componentes y, con ello, al empobrecimiento de la sociedad. Por tanto, si nos interesan tanto el sistema (aunque no necesariamente el «*establishment*») como el individuo, conviene que ideemos un régimen político que combine los aspectos buenos del individualismo y del colectivismo. Sin embargo, deberemos dejar el asunto de los regímenes políticos para el Volumen 7 de este *Tratado*.

4. La estructura social

4.1. Las relaciones sociales básicas

Hemos distinguido entre las relaciones, en general, y las conexiones (ligaduras, acoplamientos o vínculos) en particular (Capítulo 1, Sección 1.2). En el caso de las relaciones sociales, distinguimos los vínculos sociales, tales como las relaciones de intercambio, de las relaciones sociales no vinculantes, tales como las de pertenecer al mismo grupo profesional. Si hay un vínculo entre dos individuos, luego, al menos uno de ellos tendrá un comportamiento diferente del que hubiera tenido si tal vínculo no hubiese existido. En cambio, una relación no vinculante no modifica los elementos de la relación. (Sólo el percatarse de la pertenencia al mismo grupo social puede inducir un sentimiento de solidaridad, u hostilidad, y con ello influenciar el comportamiento social. En la jerga

de los sociólogos, la «percepción» de una relación afecta, con seguridad, el comportamiento).

Entre los vínculos sociales destacaremos, ahora, los que son básicos, vale decir, aquellos de los cuales dependen los demás, tales como las relaciones de parentesco y las relaciones de poder económico, cultural y político. Podemos caracterizarlas como sigue:

DEFINICIÓN 5.17 Una relación social *básica* es una relación social que es
(i) vinculante,
(ii) persona a persona (en lugar de sistema a sistema) y
(iii) una interacción (en lugar de una acción unilateral).

Supondremos que todas las relaciones sociales o bien son básicas, o bien son generadas por las relaciones de esta clase:

POSTULADO 5.8 Si σ es una sociedad, luego,

(i) para toda relación persona a persona no vinculante X, perteneciente a la estructura de σ, existe una relación persona a persona vinculante Y, perteneciente a la misma estructura, tal que, para cualesquiera componentes a y b de σ, si Xab, luego, existen componentes c y d de σ, tal que Ycd, donde c y d son posiblemente iguales a a y b respectivamente;

(ii) para toda relación sistema a sistema (vinculante o no vinculante) U, perteneciente a la familia de subsistemas de σ, existe una relación persona a persona vinculante V, perteneciente a la estructura de σ, tal que para cualesquiera subsistemas x e y de σ, si Uxy, luego, existe al menos un componente a de x y otro b de y, tal que Vab.

Ejemplo 1 Los propietarios de esclavos a y b, que viven en lugares y épocas diferentes (y, por consiguiente, no están vinculados), son socialmente equivalentes (~) en virtud de su calidad de propietarios (M) de esclavos (S): $a \sim b =_{df} (\exists x)(\exists y)\ (Sx \,\&\, Sy \,\&\, Max \,\&\, Mby)$. *Ejemplo 2* La fábrica a suministra al negocio b la mercadería (o los bienes) c, o, de forma abreviada, $Sabc$. Esto se reduce a lo siguiente: los miembros de a producen c y los miembros de a (los mismos u otros diferentes) suministran c a los miembros de b. En símbolos obvios: $Sabc =_{df} (\exists x)(\exists y)(\exists z)$ $(x \in \mathscr{C}(a) \,\&\, y \in \mathscr{C}(a) \,\&\, z \in \mathscr{C}(b) \,\&\, Pxc \,\&\, Dycz)$.

Los vínculos sociales pueden clasificarse, a su vez, en voluntarios e involuntarios. Las relaciones voluntarias son aquellas en las que el individuo participa por elección –por ejemplo, la amistad, la participación en actividades comunitarias y (en las sociedades industrializadas y en

épocas de pleno empleo) hasta las relaciones laborales. Ejemplos de vínculos involuntarios son la relación filial, la de ser instruido en el parvulario, la que se da entre prisionero y captor, y los vínculos de esclavitud y servidumbre. Suponemos que, así como los vínculos determinan las relaciones no vinculantes, los vínculos involuntarios determinan algunos vínculos voluntarios. Por ejemplo, ser un prisionero, un siervo o un esclavo determina la mayoría de las demás relaciones que una persona pueda mantener con otros individuos. La sola existencia y el carácter básico de las relaciones involuntarias basta para echar por tierra la filosofía del voluntarismo, según la cual la voluntad del individuo es el origen de todo su comportamiento. La verdad se halla entre los extremos del voluntarismo y el determinismo total: el hombre puede actuar según su libre arbitrio (Teorema 4.3), pero no siempre (Postulado 5.7).

De todos los vínculos sociales involuntarios, las relaciones familiares son las más básicas porque están determinadas por la reproducción, que es una biofunción. Por consiguiente, la familia está situada en la interfaz biosocial. Así pues, la base de la familia es la división por sexos. En otras palabras, la relación $\sim_S$, que consiste en ser del mismo sexo, divide la composición total $\mathscr{C}(\sigma)$ de una sociedad σ en dos conjuntos disjuntos: varones (V) y mujeres (M). Abreviado: $\mathscr{C}(\sigma)/\sim_S = \{V, M\}$. Se puede definir la familia humana de clase restringida o nuclear como un agregado de humanos corresidentes entre los cuales existen relaciones o bien de apareamiento (o de pareja), o bien parentales. La relación μ de apareamiento (o, mejor dicho, su grafo) está incluida en el producto cartesiano $V \times M$. La relación π de ser padre/madre de alguien es una relación binaria en $\mathscr{C}(\sigma)$. Y la relación de corresidencia ρ también puede interpretarse como una relación binaria perteneciente al mismo conjunto. Esto es todo lo que necesitamos para formular la

DEFINICIÓN 5.18 Sea σ una sociedad con división sexual $\mathscr{C}(\sigma)/\sim_S$, relación de apareamiento μ, vínculo parental π, y vínculo de corresidencia ρ. La *familia nuclear* $F(b)$ del componente b de σ es el sociosistema constituido por la(s) pareja(s) y los hijos de b que viven con b:

$$\mathscr{C}(F(b)) = \{x \in \mathscr{C}(\sigma) \mid (\mu xb \vee \pi bx) \,\&\, \rho xb\},$$
$$\mathscr{E}(F(b)) \supset \mathscr{E}(\sigma) \,\&\, \mathscr{E}(F(b)) \cap \mathscr{C}(\sigma) \neq \varnothing,$$
$$\mathscr{S}(F(b)) = S \cup T, \qquad \text{donde } S = \{\mu, \pi, \rho\}.$$

Un miembro de una familia nuclear puede tener más de un cónyuge (como en los casos de las bandas, la poligamia y la poliginia) a condición de que sus parejas sean corresidentes. Pero una persona pertenece sólo a una familia nuclear. (Una viuda sin hijos constituye, ella sola, una familia nuclear, aunque puede pertenecer a una familia extendida). El conjunto de las familias nucleares es la composición del sistema de parentesco nuclear de la sociedad. Este conjunto está dividido en conjuntos disjuntos por la relación de pertenencia a la misma familia. La importancia de esta relación y de la partición que ésta induce se justifica mediante la

DEFINICIÓN 5.19 Sea σ una sociedad. Luego,

(i) dos componentes de σ son *equivalentes en cuanto a familia* ($\sim_f$) sii son componentes de la misma familia:

Para todo $x, y \in \mathscr{C}(\sigma)$, $x \sim_f y =_{df} \{(\exists z)\ (z \in \mathscr{C}(\sigma)\ \&\ x \in \mathscr{C}(F\ (z))\ \&\ y \in \mathscr{C}(F\ (z))\}$;

(ii) el *sistema de parentesco nuclear* de σ es un subsistema cuyos miembros pertenecen a una familia, de modo tal que su composición es

$$\mathscr{C}_n(\sigma) = \{x \in \mathscr{C}(\sigma) \mid (\exists y)\ (y \in \mathscr{C}(\sigma)\ \&\ x \in \mathscr{C}(F\ (y))\};$$

(iii) la *estructura de familias* de σ es el conjunto de todas las familiar nucleares de σ, vale decir, la partición de $\mathscr{C}_n(\sigma)$ por la relación $\sim_f$ de equivalencia de familia:

$$\mathscr{F}(\sigma) = \mathscr{C}_n(\sigma) \sim_f .$$

A causa de la base biológica de la familia, la estructura de familias de una sociedad constituye su estructura fundamental. Por consiguiente, es la base de las demás particiones sociales. Por ejemplo, en lugar de ser una colección de individuos, una clase social es cierto conjunto de familias y, en consecuencia, un subconjunto de la estructura de familias. Y hasta aquí llegamos con las llamadas relaciones de sangre.

Otras relaciones sociales importantes son aquellas de las cuales se dice que «están basadas» en el trabajo, es decir, esas relaciones en las que la gente participa en virtud de su trabajo. De este tipo son las relaciones «verticales» que se establecen entre un obrero y un miembro de la administración de su empresa, así como la relación «horizontal» entre dos

trabajadores que pertenecen al mismo escalafón de una organización. Véase la Figura 5.11.

DEFINICIÓN 5.20 Dos personas mantienen una *relación de producción vinculante* sii o bien

(i) ambos individuos participan en la producción de un conjunto de productos (bienes y servicios), sea como trabajadores primarios (L) o secundarios (K); o

(ii) uno de los individuos produce bienes materiales o culturales, mientras que el otro gestiona (controla, supervisa) al primero; o

(iii) los dos individuos cogestionan a, por lo menos, un productor.

En otras palabras, las relaciones de producción pueden ser de coproducción, de gestión o de cogestión. Todas ellas se «basan» en el trabajo primario, ya sea directa o indirectamente, por cuanto sin trabajo primario no habría producción en absoluto. Y sin relaciones de producción, la estructura social sería muchísimo más pobre. Adviértase, sin embargo, que no toda relación de producción es vinculante. Por ejemplo, la relación de pertenencia a un grupo profesional, vale decir, de hacer el mismo tipo de trabajo, no es vinculante. Los individuos con la misma profesión ingresan en relaciones vinculantes únicamente cuando se reúnen y forman un sindicato o alguna otra organización «basada en» el trabajo. Pero estas relaciones ya no son económicas: son políticas, en nuestro sentido de la palabra, ya que tienen su principal impacto en el comportamiento social, no en la producción.

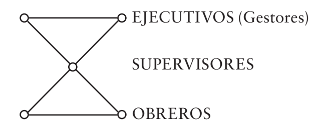


Figura 5.11. Fragmento de una red de relaciones sociales de producción en particular, en un sistema económico.

Sean económicas, culturales o políticas, las relaciones sociales influyen en el comportamiento. Si esa influencia es determinante, le llamamos ‘poder’ o ‘control’. Las influencias sociales de toda clase entran en la

DEFINICIÓN 5.21 Sea σ una sociedad en la que se realiza cierta actividad de tipo $A \subset \mathcal{S}(\sigma)$. Luego, para cualesquiera componentes x e y de σ, x

influye en *y en el aspecto A* sii la actividad de la clase *A* realizada por *y* mientras se comunica con *x* difiere de la realizada por *y* cuando éste no se comunica con *x*.

Esta definición tiene en cuenta las influencias indirectas, es decir, aquellas mediadas por terceras personas. En consecuencia, aunque un trabajador nunca vea a un accionista de la empresa en la que trabaja, cada uno de ellos influye sobre el otro a través de la administración de la empresa. (Con todo, la relación de influencia que acabamos de definir no es transitiva; y tampoco es intransitiva).

La influencia concertada es la presión de grupo: no se trata de una misteriosa influencia ejercida por un grupo como totalidad, sino de la influencia simultánea y convergente de varios individuos de un grupo sobre un único individuo. Más precisamente, formularemos la

DEFINICIÓN 5.22 Sea $s \subset \mathscr{C}(\sigma)$ un subconjunto de la composición de una sociedad σ. Luego, *s* ejerce *presión* (de grupo) sobre un componente *x*, perteneciente a σ, en el aspecto *A* sii cada miembro de *s* influye en *x* en el aspecto *A*.

Podemos decir que existe *poder* o *control* cuando la influencia es mucho más intensa en una dirección que en la dirección opuesta. La influencia y el poder se pueden cuantificar y, por consiguiente, es posible definir una relación de equivalencia de poder mediante la inducción de una partición de la composición de una sociedad en grupos que ejerzan el mismo poder en un aspecto dado. El motivo de las reflexiones previas es que, a fin de desvelar los grupos sociales de una sociedad, debemos reconocer las relaciones sociales vinculantes con ayuda de las cuales es posible definir las relaciones (no vinculantes) de equivalencia sociales que inducen la partición de la composición de una sociedad en grupos sociales homogéneos. Éste es el método que usaremos para poner de manifiesto la estructura social de una sociedad.

4.2. La estructura social

Cada vínculo social $B_k \in \mathbb{B} \subset S$ de una sociedad genera una relación de equivalencia social $\sim_k$ que, a su vez, induce una partición $\mathscr{P}_k = \mathscr{C}(\sigma) / \sim_k$ de la composición de la sociedad σ en una familia de conjuntos homogéneos (grupos sociales). Existen tantas particiones de esta clase como rela-

ciones de equivalencia social. Llamaremos estructura social de la sociedad a la colección de todas esas particiones. Más precisamente, proponemos la

DEFINICIÓN 5.23 Sea σ una sociedad con composición $\mathscr{C}(\sigma)$ y llamemos

$$\sim = \{\sim_k \mid \sim_k \subset \mathscr{C}(\sigma) \times \mathscr{C}(\sigma) \ \& \sim_k \text{ es una relación de equivalencia } \& \ 1 \leq k \leq n\}$$

el conjunto de relaciones de equivalencia social definible en $\mathscr{C}(\sigma)$ sobre la base de los vínculos sociales. Luego,

(i) la k-ésima *estructura social primaria* de σ es la k-ésima partición de $\mathscr{C}(\sigma)$, vale decir, $\mathscr{P}_k(\sigma) = \mathscr{C}(\sigma) / \sim_k$, donde $\sim_k \in \sim$;

(ii) el i-ésimo grupo *social* de la k-ésima estructura primaria de (o, de forma abreviada, la celda *ik*) de σ es el i-ésimo miembro de S_{ik} de

$$\mathscr{P}_k(\sigma) = \{S_{1k}, S_{2k}, \ldots, S_{ik}, \ldots, S_{mk}\}, \quad \text{con} \quad \bigcup_i S_{ik} = \mathscr{C}(\sigma) \quad \text{y} \quad \bigcap_i S_{ik} = \varnothing;$$

(iii) la *estructura social primaria global de* σ es la familia de todas las estructuras sociales parciales de σ, vale decir,

$$\mathscr{P}(\sigma) = \{\mathscr{P}_k \mid \mathscr{P}_k = \mathscr{C}(\sigma) / \sim_k \ \& \sim_k \in \ \sim \ \& \ 1 \leq k \leq n\}.$$

La matriz $\|S_{ik}\|$ exhibe la estructura social global de una sociedad. Cada entrada de esta matriz representa un grupo o celda social. (Para la matemática de conjuntos de matrices, véase Bunge, 1974d). El concepto cuantitativo correspondiente se obtiene por el sencillo expediente de contar la población de cada celda en un instante dado, o sea, averiguando cómo se distribuye la población total $|\mathscr{C}(\sigma)| = N$ de la sociedad entre sus diversos grupos. Si llamamos $N_{ik} = |S_{ik}|$ a la población de la celda S_{ik}, podemos formar la *matriz de densidad de población de* σ:

$$\|D_{ik}\| = (1/N) \|N_{ik}\|, \quad \text{con} \quad \Sigma_i N_{ik} = N.$$

Una estructura social primaria es una partición de la composición de una sociedad en grupos o celdas de individuos. Pero en algunos casos, los propios grupos pueden agruparse para formar grupos más numerosos o, incluso, sistemas. Por ejemplo, la colección de las familias puede

dividirse en clases sociales, grupos educativos, grupos de ingresos, facciones políticas, etc. Igualmente, la colección de las empresas se puede dividir en agrícolas, industriales y de servicios; o en estatales, cooperativas y privadas, etc. Llamaremos estructura secundaria a toda partición realizada tras una partición primaria:

DEFINICIÓN 5.24 Sea $\mathcal{P}_k(\sigma) = (\mathcal{C}(\sigma) / \sim_k)$, donde $\sim_k \in \sim$, una estructura social primaria de σ. Luego,

(i) la *km*-ésima *estructura secundaria* de σ es

$$\mathcal{P}_{km}(\sigma) = (\mathcal{C}(\sigma) / \sim_k) / \sim_m, \quad \text{donde} \quad \sim_m \in \sim \quad \text{y} \quad m \neq k;$$

(ii) la *estructura social secundaria global de* σ es la totalidad de las estructuras secundarias parciales de σ:

$$\mathcal{PP}(\sigma) = \{\mathcal{P}_{km}(\sigma) | \mathcal{P}_{km}(\sigma) = (\mathcal{C}(\sigma) / \sim_k) / \sim_m \ \& \sim_m \in \sim \& \ m \neq k \ \& \ 1 \leq k, m \leq n\}.$$

Evidentemente, no todas estas particiones tienen importancia sociológica. Por ejemplo, resulta absurdo agrupar las empresas según su trasfondo cultural o dividir el conjunto de las familias en privadas, cooperativas y estatales. Los conjuntos resultantes de estas particiones no naturales o carentes de importancia o bien se ignoran, o bien se igualan al conjunto vacío. En particular, $\mathcal{P}_{kk}(\sigma) = \emptyset$. Y tal como en el caso de la estructura social primaria, podemos contar los elementos y construir la matriz de densidad de la estructura secundaria global de la sociedad.

Puesto que tanto la estructura primaria de una sociedad como su estructura secundaria son conjuntos de conjuntos, se podría preguntar si representan propiedades de la sociedad. Sí, lo hacen, ya que se las puede considerar valores de funciones que representan propiedades, a saber,

$$\mathcal{P}_k: \Sigma \longrightarrow \{\mathcal{C}(\sigma) / \sim_k | \sigma \in \Sigma\} \quad \text{y}$$
$$\mathcal{P}_{km}: \Sigma \longrightarrow \{(\mathcal{C}(\sigma) / \sim_k) / \sim_m | \sigma \in \Sigma\},$$

donde $\mathcal{C}(\sigma)$ es la composición de σ y Σ la totalidad de los sistemas sociales. Además, lejos de ser arbitrarias, estas funciones se presentan en las leyes sociales.

Los conceptos de estructuras sociales primaria y secundaria globales nos permiten exactificar la vaga noción de tejido social: el tejido

social de una sociedad σ es el conjunto de todas las estructuras sociales primarias y secundarias de σ, vale decir,

$$\mathscr{P}(\sigma) \cup \mathscr{P}\mathscr{P}(\sigma).$$

Por último, dos palabras acerca de la clase social y la estructura de clases. No todos los grupos sociales son clases y, por consiguiente, no todas las sociedades divididas en grupos tienen que ser, necesariamente, estratificadas. Una clase o casta social mantiene una relación de control con otros grupos de la sociedad. Ese control puede ser económico, político, militar, administrativo o cultural. Estos grupos dominantes se originan por diversos medios, desde la conquista militar hasta la concentración gradual del poder. Un caso típico es el de las aristocracias medievales. Pequeñas bandas de soldados, contratados originalmente para defender un territorio de los merodeadores o de los caudillos, acabaron utilizando la fuerza militar para conseguir su pleno control económico y político. Lo que había sido una división horizontal de la sociedad, se transformó en una división vertical, es decir, en una estratificación u orden jerárquico de clases sociales. Este mecanismo es bastante general: la concentración de poder de un grupo social lo transforma en una clase social. Y dado que el poder puede ser económico, cultural o político, debemos distinguir tres clases de clases sociales. O sea, una única sociedad se puede dividir en clases económicas, culturales y políticas. En ocasiones estas tres particiones coinciden, pero en general ése no es el caso. Por ejemplo, en una teocracia hay, esencialmente, dos clases: la casta sacerdotal –que concentra todo el poder económico, cultural y político– y la casta laica. En cambio, en una democracia occidental contemporánea hay, básicamente, dos clases sociales (la de los propietarios de los medios de producción y la de los que no lo son), dos clases culturales (la de productores y la de consumidores de bienes y servicios) y, al menos en teoría, una única clase política (la de los ciudadanos). Resumiremos todo lo anterior en la

DEFINICIÓN 5.25 Sea σ una sociedad y s y t dos grupos de σ. Además, sea $\sim_A$ una relación de equivalencia social en el aspecto A, donde A simboliza 'economía', 'cultura' u 'organización política'. Luego,

(i) el grupo *s controla* al grupo t en el aspecto A sii todo miembro de t es controlado en el aspecto A por algún miembro (o algunos miembros) de s;

(ii) una *clase social-A* es un grupo social que controla a otro(s) grupo(s) social(es) de la misma sociedad respecto de A, o es controlado por ellos en el aspecto A;

(iii) la *estructura de clases-A* de σ es la partición de la composición de σ por $\sim_A$, vale decir,

$$C_A(\sigma) = \mathscr{P}_A(\sigma) = \mathscr{C}(\sigma) / \sim_A;$$

(iv) la *estructura de clases* de σ es la familia de todas las estructuras de clases parciales de σ, es decir,

$$C(\sigma) = \{\mathscr{P}_A(\sigma) \mid A = \text{economía, cultura u organización política}\}.$$

Si el cociente de $\mathscr{C}(\sigma)$ sobre $\sim_A$ no divide la composición de σ en subconjuntos disjuntos, entonces no hay control-A en la sociedad y, por ende, la sociedad no contiene clases-A. En otras palabras, σ *carece de clases* en el aspecto A sii $\mathscr{C}(\sigma) / \sim_A = \{\mathscr{C}(\sigma)\}$. De ello se deduce que una sociedad sin clases-A sólo es posible si cada uno de sus componentes participa ampliamente en las actividades de la clase A. Nos ocuparemos del problema de la participación en la siguiente subsección.

4.3. La diferenciación y la cohesión

Ninguna sociedad es homogénea en todos sus aspectos: toda sociedad está diferenciada, vale decir, dividida en grupos sociales, aunque sólo sea en grupos por edad y sexo. Una medida natural, si bien admitidamente tosca, de la diferencia entre dos grupos sociales A y B es la numerosidad de su diferencia simétrica $A \Delta B = (A \cap \overline{B}) \cup (\overline{A} \cap B)$. En consecuencia, si sumamos las numerosidades de las diferencias por pares entre todas sus celdas sociales, vale decir, $|S_{pq} \Delta S_{rs,}|$ obtenemos una medida de la diferenciación (o variedad) social de una sociedad. Además, puesto que nos viene bien que ese resultado esté entre cero y uno, dividimos el total entre un factor de normalización adecuado. El resultado final (Bunge y García-Sucre, 1976) es la

DEFINICIÓN 5.26 Sea σ una sociedad con una matriz de estructura social $\|S_{ik}\|$, en la cual $S_{ik} \in \mathscr{C}(\sigma)/\sim_k$ es la i-ésima celda que garantiza la partición de $\mathscr{C}(\sigma)$ por una relación de equivalencia social $\sim_k \in \sim$. Además, sea N la población total de σ en un instante dado y n el número de relaciones de equivalencia social (vale decir, $N = |\mathscr{C}(\sigma)|$, $n = |\sim|$). Luego, el *grado de diferenciación social* de σ con respecto a $\sim$ en el instante dado es igual a

$$\delta(\sigma, \sim) = [2N(N-1)n^2]^{-1} \sum_{\sim q \in \sim} \; \sum_{Spq \in \mathscr{C}(\sigma)/\sim q} \; \sum_{\sim s \in \sim} \; \sum_{S\,rs \in \mathscr{C}(\sigma)/\sim s} |S_{pq} \Delta S_{rs}|.$$

Esta fórmula se simplifica del siguiente modo:

$$\delta(\sigma, \sim) = [n(N-1)]^{-1} \sum_k (n_k - 1),$$

donde n_k es el número de celdas producidas por la k-ésima partición, es decir, $n_k = |\mathscr{C}(\sigma)/\sim_k|$.

La diferenciación mínima tiene lugar cuando cada partición produce una única clase, a saber, la propia $\mathscr{C}(\sigma)$, vale decir, cuando todos son todo. En este caso, $\delta = 0$. En el otro extremo del espectro hay sólo un individuo en cada grupo social, es decir, $|S_{ik}| = 1$ y $n_k = N$ para cada par (i, k). El valor correspondiente es $\delta = 1$. Consideramos que ninguno de estos valores extremos es realista. El caso intermedio es aquel en el que todas las celdas están ocupadas de manera uniforme, vale decir, $|S_{ik}| = m$ y $n_k = N / m$, con $1 < m < N$ para todo k. El grado de diferenciación correspondiente es

$$\delta(\sigma, \sim) = (N-m)/m(N-1) \longrightarrow 1/m \quad \text{para } N \longrightarrow \infty.$$

Decimos que una persona que pertenece a un grupo social *participa* en él. La participación requiere diferenciación: no hay oportunidad de participar si no hay diferentes grupos sociales. (Sin embargo, la participación también es nula si la diferenciación es máxima, ya que en este caso ningún individuo pertenece a más de un grupo social. Las participaciones individuales se agregan y forman una propiedad sistémica que podemos llamar *participación global* en una sociedad. Ésta se compone de los solapamientos de todos los grupos sociales, vale decir, de $S_{pq} \cap S_{rk}$. Más precisamente, formulamos la

DEFINICIÓN 5.27 Sea σ una sociedad cuya composición está dividida por las n relaciones de equivalencia contenidas en ~. Luego,

(i) el *grado de participación del grupo* S_{pq} en σ es

$$\pi(S_{pq}, \sigma, \sim) = \sum_{\sim s \in \sim} \sum_{S_{rs} \in \mathscr{C}(\sigma)/\sim s} |S_{pq} \cap S_{rs}| / |S_{rs}|;$$

(ii) el *grado de marginalidad* (o *enajenación*) del grupo S_{pq} en σ es el complemento hasta la unidad de su grado de participación, es decir,

$$\mu(S_{pq}, \sigma, \sim) = 1 - \pi(S_{pq}, \sigma, \sim);$$

(iii) el *grado de participación global* en σ es

$$\pi(\sigma, \sim) = F \sum_{\sim q \in \sim} \sum_{S_{pq} \in \mathscr{C}(\sigma)/\sim q} \sum_{\sim s \in \sim} \sum_{S_{rs} \in \mathscr{C}(\sigma)/\sim s} |S_{pq} \cap S_{rs}|,$$

donde F es el factor de normalización que garantiza que el valor máximo de π sea 1;

(iv) el *grado de marginación* (o *enajenación*) *global* en σ es

$$\mu(\sigma, \sim) = 1 - \pi(\sigma, \sim).$$

A partir de los descubrimientos de los científicos sociales, inferimos que todas las sociedades están diferenciadas, aunque ninguna lo está máximamente y en todas hay algún grado de participación. O sea, proponemos el

POSTULADO 5.9 Para toda sociedad σ, $|\sim| > 1$ y $0 < \delta(\sigma, \sim) < 1$, $0 < \pi(\sigma, \sim) < 1$.

Todas las sociedades son más o menos cohesivas: si no lo fueran no serían sistemas. La cohesión social, desde luego, es una propiedad social emergente: se trata de una propiedad sistémica de la que carecen los individuos componentes de una sociedad. La cohesión puede ser espontánea, forzada o una combinación de las dos. La cohesión espontánea, la que no resulta de la coacción, es sin duda la más importante de las

tres. Cuando es intensa, garantiza la estabilidad del tejido social; cuando es débil, requiere o bien un cambio de estructura, o bien la represión violenta de todo intento de realizar cambios estructurales.

En el Capítulo 4 supusimos que la cohesión deriva de la compartición (de cosas y servicios) y de la participación (en las actividades): recuérdese el Postulado 4.24. A continuación analizaremos una medida de la cohesión espontánea basada en ese supuesto (Bunge y García-Sucre, 1976). La ausencia total de participación, es decir, la segregación extrema, tiene como resultado la inestabilidad, la cual acaba en la fragmentación. Con todo, la participación máxima tiene un efecto desintegrador parecido, ya que una sociedad de iguales en todos los aspectos es una colección de competidores que no necesitan ayuda mutua, vale decir, que no necesitan pertenecer a la sociedad; en otras palabras, sea la participación totalmente marginal o ubicua, la cohesión es mínima. La cohesión máxima, por tanto, debe estar en algún lugar entre esos extremos, donde cada individuo comparta varias –pero de ningún modo todas– celdas con compañeros. En resumen, la cohesión debe ser producto de la participación moderada. A continuación formalizaremos esta idea intuitiva.

Cuantos más miembros compartan dos grupos sociales, mayor será la intensidad de sus vínculos. Sin embargo, éstos sólo operan si los grupos son diferentes, en particular si son funcionalmente complementarios entre sí. Más precisamente, la vinculación real entre dos grupos sociales A y B es la numerosidad de su intersección por la de su diferencia simétrica, vale decir, $|A \cap B| \cdot |A \Delta B|$. Un bajo grado de diferenciación (es decir, un valor $|A \Delta B|$ pequeño) puede ser compensado por un elevado grado de participación (vale decir, un alto valor de superposición $|A \cap B|$) y viceversa. Ciertamente, la diferenciación por sí sola no contribuye a la cohesión, pero las diferentes particiones (estructuras) pueden entrecruzarse de tal forma que se produce la cohesión: vale decir, las celdas situadas en diferentes columnas de la matriz de estructura social pueden solaparse parcialmente. Al añadir todos los vínculos por pares entre los grupos sociales de una sociedad, obtenemos su cohesión:

DEFINICIÓN 5.28 Sea σ una sociedad cuya composición está dividida por las n relaciones de equivalencia social contenidas en $\sim$. Luego el grado de *cohesión social espontánea* de σ con respecto a $\sim$ es igual a

$$k_s(\sigma, \sim) = [2N(N-1)n^2]^{-1} \sum_{\sim q \in \sim} \sum_{Spq \in \mathscr{C}(\sigma)/\sim q} \sum_{\sim s \in \sim} \sum_{S\,rs \in \mathscr{C}(\sigma)/\sim s}$$

$$|S_{pq} \cap S_{rs}| \cdot |S_{pq} \Delta S_{rs}|,$$

donde el término *pqrs* de la sumatoria representa la fortaleza del vínculo entre las celdas S_{pq} y S_{rs}, la cual es el producto de la participación social por la diferenciación.

Las celdas disjuntas no aportan a la cohesión mientras que las celdas que se solapan sí lo hacen, siempre que sean un poco diferentes. Si la medida de todos los solapamientos no vacíos es la unidad, vale decir, si $|S_{pq} \cap S_{rs}| = 1$ para todos los pares de celdas, excepto para los que están en la misma columna de la matriz de estructura social, entonces la cohesión se reduce a la diferenciación (Definición 5.26). Si, en cambio, todas las diferencias locales son las mismas y, en particular, si $|S_{pq} \Delta S_{rs}| = 1$, luego la cohesión coincide con la participación (Definición 5.27).

La diferenciación mínima conlleva la cohesión mínima. De hecho, si $|S_{ik}| = N$ y $n_k = |\mathscr{C}(\sigma)/\sim_k| = 1$ para todo k, luego, $S_{pq} = \mathscr{C}(\sigma)$ independientemente de q, de donde $S_{pq} \Delta S_{rs} = \varnothing$ en todos los casos, por lo cual $k_s(\sigma, \sim) = 0$. Asimismo, de la diferenciación máxima se sigue la total falta de cohesión. En efecto, si $|S_{ik}| = 1$ y $n_k = |\mathscr{C}(\sigma)/\sim_k| = N$ para todo k, los solapamientos son no vacíos en el preciso caso en que las celdas coincidan, lo que supone que la diferencia simétrica es nula. En resumidas cuentas, en este caso también $k_s(\sigma, \sim) = 0$. Finalmente, considérese el caso de homogeneidad intermedia: $|S_{ik}| = m$ y $n_k = |\mathscr{C}(\sigma)/\sim_k| = N/m$ para todo k, y $|S_{pq} \cap S_{rs}| = t$, a menos que las celdas se encuentren en la misma columna. Lo que sucede es que en este caso

$$k_s(\sigma, \sim) = N_t(m-t) / (N-1)m^2 \cong t(m-t)/m^2.$$

El valor máximo de cohesión espontánea para este caso homogéneo se da para $t = m/2$ y es

$$k_s(\sigma, \sim) = ¼\ N(N-1) \cong ¼.$$

En resumen, la cohesión de una sociedad consiste en la participación moderada de sus miembros en los diversos grupos sociales de la comunidad. Si la comunidad no está diferenciada, no hay donde participar y la competencia supera la cooperación, por lo cual la cohesión es baja. Si

la diferenciación es rígida, como en el caso de las sociedades jerárquicas (por ejemplo, los sistemas de castas) tampoco hay donde participar: en este caso, la estabilidad no es producto de la cohesión espontánea, sino que se impone por la fuerza de las armas o de la ideología.

A diferencia de la cohesión espontánea, la cohesión forzada está relacionada con la represión cultural o política, vale decir, con la acción de ideologías organizadas (por ejemplo, iglesias y partidos), de las fuerzas policiales u otras parecidas. Aunque la cohesión forzada es una variable de salida, grosso modo, se puede utilizar como indicador de la misma su correspondiente variable de entrada, a saber, la intensidad de las fuerzas represivas relativamente a la población total. Si llamamos $k_f(\sigma)$ a cualquier indicador del grado de cohesión forzada que podamos escoger, podemos definir la *cohesión total* de σ como $k(\sigma) = k_s(\sigma) + k_f(\sigma)$. (Al ignorar el conjunto ~ de relaciones de equivalencia social que usamos para calcular $k_s(\sigma)$ damos por supuesto, tácitamente, que estamos teniendo en cuenta todas las relaciones «significativas» de esa clase). En principio, $k(\sigma)$ está comprendido entre 0 y 2.

Hay diversas definiciones del concepto de sociedad libre. Puesto que la mayoría de ellas son ideológicas en lugar de científicas, hay pocas esperanzas de que pueda llegarse al consenso. Así pues, mientras que *X* incluye, con razón, la libertad de prensa entre las condiciones necesarias para que haya una sociedad libre, *Y* replicará, con igual razón, que esa libertad es ilusoria en tanto y en cuanto sólo puedan ejercerla quienes disponen de la libertad económica para manejar la prensa. Nosotros podemos evitar esta discusión proponiendo un criterio objetivo y hasta cuantitativo de *libertad política*, a saber, éste: una sociedad es *políticamente libre* sii su cohesión espontánea es mucho mayor que su cohesión forzada.

Si una sociedad no es políticamente libre, vale decir, si su estructura social se mantiene o modifica gracias a la fuerza de las armas o la ideología, entonces esta fuerza supera, equilibra o, en última instancia, suscita la rebelión de algunos grupos sociales. Sin embargo, la fortaleza de las fuerzas rebeldes de una sociedad no es simplemente proporcional a su número. En efecto, una pequeña banda de revolucionarios entusiastas y bien organizados que se adhiere a una causa popular, o que actúa ante la indiferencia popular, puede derrotar a un gran ejército de desmoralizados partidarios de una dictadura impopular, así como una gran muchedumbre de rebeldes desorganizados no constituye un rival para una fuerza represiva pequeña pero bien entrenada. Por consiguiente, el

politólogo, a diferencia del sociólogo, no debe estudiar únicamente los indicadores de cohesión objetiva, sino también aquéllos de la cohesión «percibida» o adhesión (Sección 3.3).

4.4. Las relaciones y las estructuras sociales: ¿son reales?

Aunque los holistas admiten la realidad de las relaciones sociales, las reducen a dos tipos: las relaciones totalidad-totalidad (o sistema-sistema) –ilustradas por las relaciones internacionales– y la relación causal totalidad-parte, cuyo supuesto ejemplo es la presión de grupo. A los holistas les interesan más las míticas totalidades que flotan sobre los individuos –tales como La Nación, El Estado y El Espíritu de la Época– que las relaciones interpersonales. Éstas, en cambio, son las relaciones en las que hacen hincapié los individualistas: «Las reiteradas interacciones entre personas particulares son el meollo mismo de la vida social» (Homans, 1974, pág. 57). Los sistemistas se adhieren plenamente a esta concepción, pero también admiten los vínculos entre sistemas (por ejemplo, el Postulado 5.8(ii)). Insisten, además, en que los vínculos sociales, sean interpersonales, sean intersistémicos, son reales siempre que acompañen cambios en los elementos de la relación (individuos o sociosistemas). En consecuencia, las estructuras sociales son perfectamente reales y son, además, el principal interés de los sociólogos.

Los científicos sociales rara vez se adhieren a los extremos holista e individualista: la mayoría estudia sistemas sociales y sus subsistemas. Además, ya sea que simpaticen con el holismo o con el individualismo, rara vez niegan la realidad de las relaciones sociales y, como consecuencia, la realidad de las estructuras sociales. (La antropología estructuralista es una excepción: afirma que las estructuras sociales están en las cabezas de los antropólogos. Véase Lévi-Strauss, 1963. Para una crítica devastadora, véase Harris, 1968).

En cambio, los filósofos de las ciencias sociales partidarios del individualismo ontológico y metodológico tienden a negar la realidad de los vínculos sociales y, con ello, la de las estructuras sociales, tal vez a causa de su afán de negar la realidad de las totalidades ensalzadas por los holistas. Así pues, Winch (1958, págs. 131 y ss.) ha sostenido que *todas* «las relaciones sociales entre los hombres existen únicamente en y a través de sus ideas» y que «pertenecen a la misma categoría lógica que

las relaciones entre ideas», por lo cual las ciencias sociales son una rama de la gnoseología. Y Popper (1974, pág. 14) ha afirmado que «las relaciones sociales pertenecen, en muchos sentidos, a lo que más recientemente he llamado "tercer mundo" o "mundo 3", el mundo de las teorías, los libros, las ideas, los problemas». En el Capítulo 4, Sección 4.5, vimos que no hay tal cosa, porque un mundo genuino –o sea, un sistema– no puede estar compuesto a la vez por cosas concretas, tales como los libros, y por ficciones, tales como las ideas en sí (vale decir, separadamente de los cerebros que las idean). Aquí nos limitaremos a advertir cuán conveniente sería para todos los opresores poder persuadir a sus sometidos de que su sometimiento pertenece al mundo de los cuentos de hadas y las fórmulas matemáticas, de modo tal que no sería posible que sufrieran por su causa, sin mencionar la posibilidad de rebelarse contra el mismo.

Ni los sociólogos, quienes estudian las relaciones y las estructuras sociales, ni los políticos, quienes intentan controlarlas, pueden tomarse en serio la afirmación de que los vínculos sociales, así como las organizaciones sociales que éstos constituyen, son ficciones. Sociólogos y políticos los consideran tan reales como los vínculos físicos y los enlaces químicos. Por eso, cuando pretenden cambiarlos recurren a la acción social, no a los encantamientos.

5. El cambio social

5.1. El enfoque de estructuras sociales

Un cambio social es un cambio de ciertas propiedades sociales de una comunidad, tal como un cambio del nivel cultural, o una redistribución del poder político o económico. En principio, es posible dar cuenta del cambio social sirviéndose del concepto de función de estado: el estado instantáneo de una sociedad sería el valor de su función de estado en un instante dado, y la historia de la sociedad en cierto período sería la lista de todos los valores instantáneos de su función de estado. Este enfoque del cambio social debería valer para los sociosistemas de pequeño tamaño. Pero incluso una tosca determinación del estado global económico, cultural y político de una sociedad moderna exigiría una abrumadora cantidad de información. Una descripción de su evolución exigiría un número igualmente abrumador de ecuaciones evolutivas (las

cuales, en el caso más simple, serían ecuaciones cinéticas para las funciones de estado). Por consiguiente, adoptaremos un método más factible.

Supondremos que todo cambio social consiste en la redistribución de la composición de una sociedad entre las diversas celdas de una matriz social $\|S_{ik}\|$. (Por ejemplo, el surgimiento o la desaparición de determinada clase de trabajo o relación de producción tendrá como resultado la formación o la extinción de las respectivas celdas sociales). En consecuencia, el seguimiento de la evolución de una sociedad se reduce a la realización de censos periódicos, que es lo que, desde luego, hace la oficina del censo. Este procedimiento nos proporciona una descripción precisa, si bien tosca, del cambio social, pero no una explicación del mismo. Más precisamente, podemos formular la

DEFINICIÓN 5.29 Sea σ una sociedad con una matriz de estructura social $\|S_{ik}\|$ y la respectiva matriz de densidad de población

$$D(\sigma, t) = (1/N(\sigma, t)) \cdot \|N_{ik}(\sigma, t)\|.$$

El *cambio estructural neto* en σ durante el intervalo temporal $[t_1, t_2]$ es

$$\Delta(\sigma; t_1, t_2) = D(\sigma, t_2) - D(\sigma, t_1).$$

Ejemplo En t_1, σ está dividida en dos clases sociales: amos (M) y esclavos (S). En el instante $t_2 > t_1$, σ está homogeneizada como una sociedad de hombres libres (F) con conservación de toda la población. (Vale decir, o bien durante la revolución no ha habido derramamiento de sangre, o bien las pérdidas han sido compensadas por los nacimientos o la inmigración). Luego, el cambio de clases neto (o cambio de la estructura de clases) es

$$(1/F) \cdot \left\| \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ F \end{matrix} \right\| - (1/F) \cdot \left\| \begin{matrix} M \\ S \\ 0 \end{matrix} \right\| = (1/F) \cdot \left\| \begin{matrix} -M \\ -S \\ F \end{matrix} \right\|, \quad F = M + S.$$

El signo negativo (positivo) expresa una pérdida (un aumento) de población en una celda. De más está decir que, en virtud de las interrelaciones que hay entre las diferentes propiedades sociales, una descripción

completa de esta (imaginaria) revolución social exigiría la investigación de todas sus celdas sociales principales.

Cualesquiera sean las causas, naturales o sociales, que puedan influir en la distribución de la población total de una sociedad entre sus celdas, se las puede agrupar en un operador de evolución social. Supondremos que este operador satisface el

POSTULADO 5.10 Sean $D(\sigma, t_1)$ y $D(\sigma, t_2)$ que representan la estructura social de una sociedad σ en los instantes t_1 y t_2 respectivamente. Luego, existe un operador $E(\sigma; t_1, t_2)$, tal que

$$D(\sigma, t_2) = E(\sigma; t_1, t_2)\, D(\sigma, t_1)$$

que representa el modo de cambio de σ durante el período $[t_1, t_2]$ y se llama *operador de evolución social* para ese período.

Se trata de un supuesto sustantivo que puede resultar empíricamente defectuoso, en particular durante un período largo: por lo que sabemos, la evolución social real bien puede ser no lineal. Sin embargo, podemos suponer que el postulado es válido, por lo menos para períodos cortos.

Del postulado anterior y la Definición 5.29 se deduce que el cambio estructural neto es

$$\Delta(\sigma; t_2, t_1) = (E(\sigma; t_1, t_2) - I)\, D(\sigma, t_1),$$

donde I es una matriz identidad adecuada. Dado el estado inicial $D(\sigma, t_1)$ y el modo de evolución $E(\sigma; t_1, t_2)$, la estructura final, es decir, $D(\sigma, t_2)$, se mantiene determinada unívocamente. Éste es el problema directo o de hacer un pronóstico. El problema inverso, o explicativo, es éste: dados los valores de la matriz de densidad en dos instantes diferentes, por ejemplo, en la actualidad y hace diez años, averiguar su modo de evolución, vale decir, calcular el operador de evolución. Puesto que se trata de un problema inverso, sucede que, en general, no tiene una única solución y resulta mucho más difícil que el problema de pronosticar. De hecho, pensemos otra vez en el ejemplo que acabamos de estudiar. Los siguientes operadores de evolución, entre otros, dan cuenta del mismo cambio estructural:

$$E = \begin{Vmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{Vmatrix} \quad \text{y} \quad E = \begin{Vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{Vmatrix}.$$

Es posible probar en general que vale lo siguiente (Bunge, 1974d):

TEOREMA 5.1 Todo cambio social dado o prescrito en una sociedad puede ser producido de modos alternativos, cada uno representado por un operador de evolución social diferente.

Además, puesto que las poblaciones de cada columna dada de la matriz de estructura social deben sumar la población total, también tenemos el

TEOREMA 5.2 El crecimiento relativo de toda celda de una columna de la matriz de estructura social acontece a expensas de la disminución relativa de otra(s) celda(s) de la misma columna.

Por ejemplo, si una columna se compone sólo de dos celdas y una de ellas crece de manera exponencial, la otra debe disminuir de forma exponencial. Así pues, todo crecimiento debe pagarse con cierta disminución.

Por último, adviértase que el cambio social es más probable cuanto más heterogénea o variada es la sociedad, aunque sólo fuera porque cuantas más celdas haya más numerosas serán las transiciones posibles entre ellas. Por la misma razón, cuanto más homogénea sea una sociedad, menos mudable será.

5.2. La historia

Los principales tipos de cambio estructural de una sociedad se listan en la

DEFINICIÓN 5.30 Sea σ una sociedad con matriz social $\|S_{ik}\|$ y matriz de población $\|N_{ik}\|$. Luego,

(i) σ se mantiene *estacionaria* (o en un estado de *equilibrio estático*) en el k-ésimo aspecto (donde $1 \leq k \leq n$) durante el período $[0, \tau]$ sii $N_{ik}(t)$ = constante para todo $1 \leq i \leq n$ y todo $t \in [0, \tau]$;

(ii) σ es estable (o está en un *estado de equilibrio dinámico*) en el k-ésimo aspecto (donde $1 \leq k \leq n$) durante el período $[0, \tau]$ sii todas las celdas de la k-ésima columna de $\|S_{ik}\|$ se expanden o se reducen al mismo ritmo:

$$N_{ik}(t) = at \quad \text{con} \quad a \in \mathbb{R}+ \quad \text{y} \quad a \neq 1 \quad \text{para todo } 1 \leq i \leq m;$$

(iii) σ experimenta *cambios cíclicos* sii existe un operador de evolución E y un número natural p tal que $p = \tau$ y $E^p = I$;

(iv) σ experimenta un *cambio irreversible* sii σ cambia de forma no cíclica;

(v) σ experimenta una *revolución parcial* sii algunas celdas cambian de manera apreciable (en particular, si se llenan o se vacían);

(vi) σ experimenta una *revolución total* sii todas las celdas cambian de manera apreciable.

Ejemplo Una sociedad se compone, inicialmente, de cuatro clases sociales, 1, 2, 3 y 4, con poblaciones N_1, N_2, N_3, y N_4 respectivamente. Una revolución barre con todo, salvo con una fracción f_i de cada clase y fusiona 1 con 2 y 3 con 4. Una representación posible del cambio neto es la que sigue:

$$\begin{Vmatrix} f_1 & f_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_3 & f_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} f_1 N_1 + f_2 N_2 \\ 0 \\ f_3 N_3 + f_4 N_4 \\ 0 \end{Vmatrix}$$

$$V = 1 - (1/N(0)) \textstyle\sum_i f_i N_i(0).$$

Este índice es igual a 0 en las revoluciones pacíficas, a 1/10 para aquellas que diezman cada estrato social y a ½ para las que toman las vidas de la mitad de la población de cada grupo.

Hasta aquí no hemos distinguido entre el cambio social espontáneo y el cambio social planificado, y, por consiguiente, entre los modelos descriptivos y los modelos normativos. Pero todas las sociedades contemporáneas, aun aquellas que tienen libertad de empresa económica, están sometidas a planificación en alguna medida y se puede afirmar que necesitan más (y mejor) de lo mismo si han de sobrevivir. Considérese el caso obvio del crecimiento poblacional. En ausencia de restricciones sociales o culturales y simulando que tampoco hay limitaciones ambientales –en particular, competencia entre poblaciones– el tamaño poblacional esperado satisface la ley cinética

$$\dot{N} = aN, \quad \text{con} \quad a = \text{tasa de nacimiento} - \text{tasa de mortalidad}.$$

Aquí $a \in \mathbb{R}$ es un parámetro que resume características biológicas, económicas, culturales y políticas, tales como la fertilidad, el estado de salud, el suministro de alimentos y el sentimiento de seguridad. Si $a > 0$, la población crece de forma exponencial, si $a = 0$ tiene crecimiento nulo y si $a < 0$ disminuye de manera exponencial. A continuación, añádase la planificación familiar sobre la base de los individuos, tal como se practica en todas las naciones industrializadas. Según los cambios económicos, culturales y políticos, puede suceder cualquier cosa: el tamaño poblacional esperado puede aumentar, disminuir, oscilar, permanecer estancado o nada de esto.

Considérese, a continuación, la planificación familiar asociada a la adopción de un desiderátum explícito referente al tamaño de familia deseable. Esta norma tendrá como resultado un objetivo poblacional total G. Emerge una nueva ley de crecimiento poblacional, una ley que está controlada por las propias familias junto con las organizaciones estatales. En el caso más simple, esta ley tiene la siguiente forma

$$\dot{N} = b(G - N) \begin{cases} > 0 & \text{sii } N < G \text{ (despoblación)} \\ = 0 & \text{sii } N = G \text{ (ideal conseguido)} \\ < 0 & \text{sii } N > G \text{ (superpoblación).} \end{cases}$$

Ahora el crecimiento de la población está bajo control. La población total crece de forma exponencial (cuando no hay guerras, pestes o hambrunas) en el preciso caso en que sea inferior al valor meta; se mantiene constante si se ha llegado al ideal y decrece tan pronto como se supera el objetivo.

Resulta obvio que la pauta anterior de cambio social planificado puede generalizarse a una celda social arbitraria, tal como un grupo educativo o profesional dado. De hecho, todas las naciones modernas planifican y controlan numerosas actividades, en particular la agricultura y la educación: piénsese, por ejemplo, en los subsidios a la primera y las limitaciones de ingreso a las escuelas de medicina.

Adviértanse las siguientes cuestiones. Primero, se puede utilizar la matemática para tratar finalidades y normas; además, la única manera de dirigir el cambio social con éxito es la que incluye el uso de modelos matemáticos. Segundo, el conocimiento y las valoraciones pueden cambiar las leyes del cambio social. Estas modificaciones con-

sisten, básicamente, en la introducción deliberada de términos de retroalimentación de la forma $G - X$, donde X es el valor presente y G el correspondiente valor meta de una variable de estado. Tercero, los controles no se limitan a las pautas temporales, sino que pueden generalizarse a cambios de toda clase. Por ejemplo, si se desea controlar la distribución espacial de una celda social (por ejemplo, agricultores, artesanos o médicos) el planificador social considerará que la densidad de cada célula es función tanto de la coordenada espacial como de la temporal, y formulará ecuaciones de difusión que contengan términos de retroalimentación o regulación.

Sean espontáneos, sean planificados, los cambios sociales que acontecen en cada celda social forman una serie temporal o secuencia temporal. Y la totalidad de estas historias sociales parciales, una por celda, constituye la historia social global de la sociedad en cuestión. Con mayor precisión, formulamos la

DEFINICIÓN 5.31 Sea σ una sociedad con una estructura social instantánea (o matriz de densidad) $D(\sigma, t)$. Luego,

(i) la *historia* de las celdas S_{ik} de σ durante el período $[0, \tau]$ es la secuencia

$$H_{ik}(\sigma; 0, \tau) = \langle D_{ik}(\sigma, t) \mid t \in [0, \tau] \rangle$$

(ii) la *historia social* (o *anónima*) de σ durante el período $[0, \tau]$ es la matriz $H = \|H_{ik}\|$ compuesta por todas las historias de las celdas sociales.

En otras palabras, al compilar los valores de densidad de una celda durante un período temporal, obtenemos la historia de esa celda durante ese período. Y si hacemos lo mismo con cada celda de la estructura social, obtenemos la historia social de la sociedad. (Podemos denominar esta perspectiva 'concepción demográfica' de la historia social). Obviamente, incluirá los efectos netos de las contribuciones de los componentes individuales de la sociedad, aunque no sus biografías. Vale decir, la historia social no exhibe los logros de los grandes hombres ni los grandes corruptos: es anónima y, por consiguiente, más difícil de reconstruir que las biografías. Se propone describir y, finalmente, explicar la evolución de las celdas y las sociedades íntegras, así como de los supersistemas que forman estas últimas. Aborda grandes problemas, especialmente los del origen y la evolución de celdas, organizaciones e instituciones

sociales completas. Por ejemplo, la historia social se ocupa del origen de la agricultura, el capitalismo, el Estado y la religión organizada, de la expansión del mercado mundial y la tecnología de punta.

Un enfoque sistémico de la historia social alienta el estudio de la evolución de sistemas propiamente dichos en lugar del estudio de unidades artificiales, tales como un reino, que son producto de la guerra o las componendas políticas. Estos sistemas sociales pueden ser restringidos, como en el caso del sistema bancario florentino durante el Renacimiento, o inmensos, como la cuenca mediterránea durante el mismo período (cf. Braudel, 1949). Además, por supuesto, el enfoque sistémico enfatizará la interdependencia de los diversos subsistemas, en lugar de pasarla por alto. Por ejemplo, estudiará la evolución del complejo militar-industrial, vale decir, el sistema simbiótico compuesto por ciertas industrias y las fuerzas armadas. O investigará las diferentes facetas de la Revolución Verde, que se inició en el laboratorio, cambió las técnicas agrícolas de la India y de otros lugares del mundo, y en forma inesperada, acabó empeorando la suerte de los campesinos pobres. Y hasta aquí llegamos con la ingeniería social fragmentaria o la política de reformas que ignora las interrelaciones entre los subsistemas económico, cultural y político de toda sociedad.

6. Comentarios finales

Hemos bosquejado una concepción sistémica de la sociedad que puede considerarse una síntesis de las dos concepciones tradicionales: el individualismo (o atomismo) y el colectivismo (u holismo). En realidad, consideramos que la sociedad y sus subsistemas no son ni un agregado de individuos ni una totalidad mística que flota sobre su humilde composición, sino un sistema compuesto por personas vinculadas por relaciones sociales. Estos lazos dan origen a relaciones de equivalencia social, tales como las de pertenecer al mismo grupo económico, cultural o político. Además, en un instante dado, esas relaciones dividen la composición de la sociedad en celdas sociales o clases de equivalencia, tales como las de los desposeídos, los analfabetos y las personas privadas de derechos políticos. Cada una de estas particiones, o conjuntos de celdas sociales, constituye una estructura social o, mejor dicho, una estructura social primaria. La estructura social secundaria cabalga sobre la

primaria, como cuando el conjunto de las familias se clasifica en grupos de ingresos equivalentes. La totalidad de las estructuras sociales de una sociedad, tanto primarias como secundarias, constituye su tejido social.

La concepción sistémica de la sociedad no debe confundirse con la concepción *organicista* [u *organísmica*], una variante del holismo según la cual los sociosistemas son organismos. Sin duda, los componentes de los sociosistemas están vivos; además, los sociosistemas nacen, se desarrollan y se extinguen. Sin embargo no son seres vivientes: si lo fueran serían válidas para ellos todas las leyes de lo viviente y, en primer lugar, las de la genética. Pero no es así, por lo cual los sociosistemas no están vivos. Ni están muertos: las categorías de vida y muerte no les son aplicables. Esto no quiere decir que sean suprabiológicos, en particular entidades espirituales, ni que sean infrabiológicos, en particular, sistemas químicos. Los sociosistemas son sistemas concretos con propiedades y leyes que les son peculiares. Son concretos a causa de que se componen de cosas concretas que interaccionan de modos concretos, así como porque transforman energía y producen cambios en su entorno. Pero son tan poco físicos o químicos como lo son los biosistemas. Podemos bautizar esta perspectiva de los sociosistemas con el nombre de *materialismo sistémico*, siempre que 'sistémico' no se confunda con 'holista' y 'materialismo' no se interprete de una manera estrictamente fisicalista.

Hemos presentado un método útil tanto para describir la estructura de una sociedad como para seguir sus variopintos cambios, a saber, el enfoque de estructuras sociales. Sin duda no agradará a los individualistas, porque consigue lo que ellos consideran imposible: la descripción del estado y de los cambios de estado de una sociedad como totalidad. Pero, si actúan de buena fe, no podrán descartar nuestra perspectiva por ser «sólo una confusión holista», puesto que está basada en una concepción de la sociedad que, al ser sistémica, no es ni holista ni individualista. Además, este método es transparente desde el punto de vista matemático, por lo que no se le puede endilgar que sea confuso, especialmente porque no incluye la confusión individualista del sociosistema con su composición.

Nuestro enfoque estructural del cambio social suscita una concepción de la historia social (o anónima) que es tan precisa como superficial: lo único que hace es mostrar cómo se llenan o se vacían las celdas sociales. Pero, por lo menos, esta concepción de la historia social es superior

tanto al mito del gran héroe como al mito del gran todo. Además, es congruente con la historia social y la demografía social contemporáneas. Y en lugar de ignorar al individuo, comprende todas las aportaciones individuales que producen cierto impacto social; vale decir, las que influyen en el comportamiento social de los demás individuos. Por último, nada impide al científico social complementar nuestro análisis descriptivo de la estructura social y el cambio social con modelos mecanísmicos capaces de explicar la estructura actual y su desarrollo.

Además de un marco general para el estudio de los sistemas sociales, hemos ofrecido medidas definidas de ciertas propiedades sociales emergentes, tales como la diferenciación, la participación y la cohesión sociales. Y hemos sostenido que toda sociedad, independientemente de cuán primitiva pueda ser, se compone de cuatro subsistemas principales: de parentesco, económico, cultural y político. Éstos no son ámbitos independientes, sino subsistemas interdependientes. En consecuencia, el olvido o el mal estado de uno de ellos conducirá, tarde o temprano, al deterioro de los demás. Además de lo dicho, dados los vínculos de retroalimentación existentes entre los diferentes subsistemas, la promoción de uno de ellos a expensas de los demás tendrá como resultado final el deterioro del propio sistema favorecido.

Así pues, el economicismo trae aparejado el marchitamiento de la cultura, la cual puede incluir una tecnología imprescindible para mantener la economía al día; además, tenderá a dejar la política en manos de «los que saben más», alentando así una concentración del poder que, finalmente, sofocará tanto la economía como la cultura. Asimismo, el politicismo, o exageración del papel de la política, puede conducir al mal funcionamiento de las propias economía y cultura a las cuales, se supone, ha de servir, hasta el extremo de no dejar nada valioso que administrar. De forma análoga, el culturalismo acabaría agotando la economía y agostando la vida política, lo cual repercutiría negativamente sobre la propia cultura, privándola de su sostén y de su influencia política. Todo lo anterior, que resulta obvio desde el punto de vista sistémico, implica una moraleja que la mayoría de los dirigentes políticos, económicos y culturales tienen que aprender: en una sociedad saludable hay un equilibrio entre sus principales subsistemas, aun durante los períodos de crecimiento vigoroso. En particular, el desarrollo unilateral (exclusivamente económico, por ejemplo) no existe, ni el desarrollo es lo mismo que el crecimiento.

Pese a que hemos propuesto un puñado de hipótesis sustantivas acerca de la naturaleza de los sociosistemas, el nuestro es, principalmente, un marco para el estudio de las cosas de esa clase, especialmente, para la construcción de teorías en las ciencias sociales. (Véase Bunge, 1974d, para la diferencia entre marco y teoría). Además, no cabe duda de que ningún marco, por más sugestivo que resulte, puede reemplazar una teoría plenamente desarrollada y comprobable. Con todo, mientras que algunos marcos conceptuales obstaculizan la concepción de teorías, otros la facilitan. El nuestro cumple su función heurística de las siguientes maneras:

(i) Fomenta el estudio de sistemas sociales, en lugar de o bien individuos extraordinarios, o bien amorfos conjuntos de personas, o totalidades, que están muy por encima de los individuos. De este modo, estimula la búsqueda de propiedades y leyes sociales.

(ii) Orienta al investigador hacia la identificación de las coordenadas de todo sistema social: su composición, su entorno (natural y artificial) y su estructura. De esta forma no se pierden de vista ni las personas, ni el ambiente ni las relaciones sociales.

(iii) Estimula el análisis de sistemas extremadamente grandes y complejos mediante su división en subsistemas más manejables, con una dinámica interna propia, así como mediante el estudio de sus interacciones. Sin estos análisis no es posible el estudio de ninguna sociedad.

(iv) Propone el reconocimiento y la caracterización de los tres subsistemas artificiales principales de toda sociedad: el económico, el cultural y la organización política. Con ello ayuda a evitar las desventajas del economicismo, del culturalismo y del politicismo.

(v) Guía la búsqueda de relaciones entre los componentes de cada subsistema, así como entre los subsistemas de todo sistema. Con ello evita las falacias del lobo solitario y de la organización aislada.

(vi) Aclara y simplifica el estudio de las llamadas transrrelaciones, o relaciones entre relaciones, mediante su interpretación como vínculos entre componentes o subsistemas de los sistemas, con un aumento importante de la claridad y la economía.

(vii) Admite las influencias culturales, en particular ideológicas, en todos los aspectos de la vida social. Pero evita la reificación de las actividades culturales y es independiente de las ideologías.

(viii) Si bien carece de ideología, nuestro marco sí que sugiere ciertas políticas sociales, tales como la de combinar la igualdad con la parti-

cipación en beneficio de la cohesión social y, por consiguiente, de la estabilidad.

Esto concluye nuestro estudio de los sociosistemas y, a la vez, el de otros géneros de sistemas concretos. A continuación regresaremos al concepto general de sistema concreto, con la ventaja de haber reconocido la variedad de las clases de sistemas y, por consiguiente, de las clases de cambios.

Capítulo 6

Una cosmovisión sistémica

En este último capítulo, generalizaremos algunos de los resultados de los capítulos anteriores. Con ello ofreceremos el núcleo de una cosmovisión sistémica. Esta *Weltanschauung* es una continuación de ciertas tradiciones filosóficas y, a la vez, está en sintonía con la ciencia contemporánea. Pero no se la debe confundir con la difundida «filosofía sistémica», una nueva versión del holismo según la cual todo es un sistema (falso) y las pautas de ser y devenir son básicamente las mismas en todos los niveles (falso). Nuestra filosofía sistemista no es ni holista ni atomista: admite la variedad de las propiedades, las clases y las pautas que hay en el universo y, mediante el uso de ciertas herramientas formales básicas, evita las oscuridades de la filosofía tradicional. La nuestra es, en resumidas cuentas, una clase de ontología científica. (Cf. Volumen 3, Introducción). Repasemos algunos de sus supuestos.

6.1. Un mundo de sistemas

Un supuesto de este libro y de su compañero, *El moblaje del mundo* (Volumen 3) es que no existen cosas aisladas: que todo interacciona con otras cosas, de suerte tal que todas las cosas concurren y forman sistemas. O sea, proponemos el

POSTULADO 6.1 Toda cosa concreta es un sistema, o bien un componente de un sistema.

Otro supuesto es que los sistemas se presentan como sistemas anidados o muñecas rusas. Por consiguiente, dado un sistema cualquiera, con excepción del universo, puede esperarse descubrir que sea parte de un supersistema. (La inversa es falsa: no todo componente de un sistema es un sistema. Al parecer, existen cosas básicas o simples, tales como los electrones y los fotones). En consecuencia, convenimos el

POSTULADO 6.2 Todo sistema, con excepción del universo, es un subsistema de otro sistema.

Por último, el propio universo no es sólo una cosa ni un agregado de cosas, sino un sistema de sistemas:

POSTULADO 6.3 El universo es un sistema, a saber, el sistema tal que todas las demás cosas son componentes del mismo.

De los supuestos previos, junto con algunos de nuestros axiomas acerca de las cosas y el cambio (Volumen 3), se deducen diversas generalizaciones amplias. Uno de estos teoremas es que todo sistema está realizando algún proceso. Segundo: todo cambio en un sistema cualquiera es legal. Tercero: puesto que todo subsistema actúa sobre otros subsistemas, o es objeto de la acción de otros subsistemas, en cierto modo existe *per aliud* (por otro) antes que de forma independiente. Cuarto: el universo como totalidad existe *per se* (por sí) y, además, es el único existente absoluto (independiente). Quinto: el universo no tiene ni principio ni fin: perdura eternamente, aunque ninguna de sus partes lo hace.

6.2. Géneros de sistemas

Los filósofos no están en condiciones de afirmar qué clases de sistemas existen o pueden existir en el universo: sólo pueden tomar nota de la variedad de sistemas que descubre la ciencia y ayudar a categorizarlos. La ciencia contemporánea, pura y aplicada, parece aceptar la existencia de cinco géneros de sistemas. (Recuérdese que una clase, tal como una especie o un género, existe en el preciso caso en que no está vacía. En sentido estricto, sólo podemos decir que son los miembros de una clase los que existen realmente. Cf. Volumen 3, Capítulo 3, Sección 4.3). Los géneros de sistemas caracterizados en los capítulos anteriores son:

S_1 = Físicos

Microfísicos, por ejemplo, átomos y campos a pequeña escala

Mesofísicos, por ejemplo, cuerpos y campos a gran escala

Megafísicos, por ejemplo, galaxias

S_2 = Químicos

Microquímicos, por ejemplo, los reactores químicos que incluyen sólo monómeros

Mesoquímicos, por ejemplo, los reactores químicos que incluyen polímeros

Megaquímicos, por ejemplo, las pilas de compost

S_3 = Biológicos

Microbiológicos, por ejemplo, las células particulares

Mesobiológicos, por ejemplo, los organismos pluricelulares individuales

Megabiológicos, por ejemplo, los ecosistemas

S_4 = Sociales

Microsociales, por ejemplo, las familias

Mesosociales, por ejemplo, las aldeas y las empresas comerciales

Megasociales, por ejemplo, las grandes ciudades y las naciones

S_5 = Técnicos

Microtécnicos, por ejemplo, este libro

Mesotécnicos, por ejemplo, las granjas y las plantas industriales

Megatécnicos, por ejemplo, un sistema de fabricación y comercialización de tablas de madera y de papel.

Comentario 1 No hemos agrupado los sistemas físicos y químicos en una sola categoría por los siguientes motivos. En primer lugar, no todas las entidades físicas son sistemas. En segundo lugar, los sistemas químicos nunca están quietos: si se detienen todas las reacciones químicas de un sistema químico, el sistema se transforma en un sistema físico. Tercero, los quimiosistemas no tienen inercia, tal como lo prueba la rapidez con que reaccionan a los insumos externos y al agotamiento de éstos. (En términos matemáticos: las ecuaciones de la cinética química son de primer orden, mientras que la mayoría de las ecuaciones de evolución físicas son de segundo grado o superiores). Cuarto, los reguladores, tales como los catalizadores, desempeñan un importante papel en los quimiosistemas, ya que hasta los iones H^+ y OH^- son catalizadores. En cambio, los únicos sistemas físicos provistos de mecanismos de control

parecen ser los artificiales. *Comentario 2* Podríamos haber distinguido un género de sistemas entre los biosistemas y los sociosistemas, a saber, los psicosistemas. Nos hemos abstenido de hacerlo por temor a fomentar el mito de las mentes incorpóreas. En nuestra opinión, los psicosistemas pertenecen al género de los biosistemas porque se trata de animales provistos de un sistema nervioso altamente desarrollado. *Comentario 3* No hemos agrupado los sistemas técnicos, vale decir, los artefactos, junto con ningún otro, a causa de que poseen características ontológicas que los distinguen de los demás: son el producto del trabajo humano y, como tales, llevan el sello de la inteligencia y la finalidad humanas, así como el de la organización social.

Resumiremos los comentarios anteriores en el

POSTULADO 6.4 En el actual estado de la evolución del universo hay cinco géneros de sistemas: físicos, químicos, biológicos, sociales y técnicos. Vale decir, la familia de los géneros de sistemas es $\mathcal{S} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$.

La prudente cláusula que alude al presente es un recordatorio de que (por lo que sabemos) las clases superiores no siempre han existido y pueden extinguirse, o bien dar lugar a nuevos géneros de sistemas. Así pues, la exploración del universo podría revelar la existencia de otros géneros de sistemas y un holocausto nuclear barrería S_3, S_4 y S_5 de la faz de la Tierra.

6.3. Las fuentes de la novedad

Aun suponiendo que el universo siempre haya contenido cosas de ciertas clases, tales como protones, poca duda cabe de que, con frecuencia, aparecen cosas de nuevas clases. O sea, por lo menos parte de la maravillosa variedad del universo es producto del cambio. Ahora bien, hay dos clases principales de cambio: cuantitativo (por ejemplo, el movimiento) y cualitativo (por ejemplo, la combinación química). En el primer caso se incluyen todos los ejes del espacio de estados de la cosa; en el segundo, a medida que acontece el cambio, surgen nuevos ejes y desaparecen otros. Sin embargo, aun el cambio cuantitativo puede acabar en una novedad cualitativa, como en el caso de las colisiones a alta velocidad de los núcleos atómicos, la reorganización de los componentes de un sistema y el crecimiento por acreción o multiplicación. Echemos

un vistazo a la reorganización y la acreción que, a primera vista, no parecen mecanismos de emergencia muy probables.

Una *reorganización* o *reestructuración* es, por supuesto, un cambio de la estructura de un sistema, vale decir, un cambio que modifica algunos de los vínculos que hay entre los componentes del sistema, aun cuando es posible que tales cambios no alteren las propiedades internas de esos componentes. Dos casos simples son las transiciones isoméricas (en un núcleo atómico o en una molécula) y la reorganización institucional sin cambio del personal. En un sistema cerrado, la reorganización reiterada tiene por resultado un estado de equilibrio y desorden en el cual no puede surgir ninguna novedad. En cambio, en un sistema abierto, ciertas reorganizaciones conllevan novedades cualitativas y aumentan el orden que pueda haber. *Ejemplos* El enfriamiento de un líquido hasta que se solidifica formando un cristal, el enfriamiento de un anillo metálico hasta que se transforma en un superconductor, la magnetización de una barra de hierro y la formación de patrones en los fluidos en los sistemas químicos. (Cf. Turing, 1952; Glansdorff y Prigogine, 1971; Haken, 1975).

Otro mecanismo que puede generar novedades cualitativas es la acreción o ensamblaje. Así pues, se cree que los planetas y las estrellas se formaron mediante la acreción gravitatoria de gases y polvo cósmico. Sin embargo, es más probable que la novedad surja a través de procesos en los que cosas heterogéneas se reúnen para formar sistemas. Esto puede suceder aun cuando sean posibles «errores», vale decir, desviaciones a partir de una pauta común, que puedan poner en peligro la compleción del proceso de ensamble. Ahora bien, en principio, la ensambladura puede tener lugar bien en una etapa –de forma instantánea o de forma gradual– o bien en varias. Por ejemplo, un proceso de ensamblaje de una etapa puede dar comienzo con la formación de decámeros a partir de monómeros, continuar con la formación de hectómeros a partir de los decámeros y así sucesivamente. Si existe una probabilidad no nula de que cada elemento (ya sea un monómero, un decámero u otro) se una a otro de un modo «erróneo» –por ejemplo, formando un sistema inestable– entonces es improbable que el proceso directo, o de una etapa, tenga como resultado sistemas de elevada complejidad. Con el aumento del número de etapas intermedias en la síntesis de un sistema complejo, la probabilidad de desviación de la normalidad disminuye y, en consecuencia, la probabilidad de éxito se incrementa. (Para el modelo matemático Crane-Rosen de ensamblaje

en múltiples etapas, véase Rosen, 1970). Puesto que este resultado es independiente de la naturaleza de las unidades que se ensamblan, así como de los vínculos que haya entre ellas, podemos suponer que todos los sistemas complejos, sean vivientes o no vivientes, se han ensamblado por etapas. Este principio general de la arquitectura de los sistemas merece su incorporación en nuestra ontología:

POSTULADO 6.5 Cuanto más complejo sea un sistema, más numerosas serán las etapas del proceso de su ensamblaje.

La hipótesis especular respecto de la anterior se refiere a la descomposición o desintegración de los sistemas: afirma que los sistemas complejos pueden desintegrarse de diversas maneras y que cada una de ellas corresponde al debilitamiento de un conjunto de vínculos entre los componentes. (Aun cosas comparativamente simples, tales como los mesones mu pueden tener diversos esquemas de desintegración). En suma, establecemos el

POSTULADO 6.6 Cuanto más complejo sea un sistema, más numerosos serán sus modos de descomposición.

6.4. La emergencia

Nuestro siguiente supuesto es que todo sistema concreto se ha ensamblado a partir, o con ayuda de, cosas pertenecientes a géneros del mismo orden o de orden inferior. A fin de formular este supuesto con cierta precisión, necesitamos la

DEFINICIÓN 6.1 Sea $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ la familia de los géneros de sistemas. Luego, S_i *precede* a S_j o, de forma abreviada, $S_i < S_j$ sii las cosas del género S_i toman parte (bien como componentes, o bien como agentes) en el ensamblaje de todo sistema perteneciente a S_j.

Nuestra hipótesis es el

POSTULADO 6.7 Para todo $x \in S_j$ existe al menos un $y \in S_i$, donde $S_i < S_j$, tal que y ha participado en el ensamblaje de x.

De momento sólo hemos afirmado que todo sistema ha sido precedido por cosas preexistentes, afirmación que es la inversa de la tesis holista

de que el todo precede a sus partes. Pero no hemos dicho exactamente qué precede a qué. Lo haremos ahora:

POSTULADO 6.8 Las relaciones de precedencia entre géneros de sistemas son

$$S_1 < S_2 < S_3 < S_4,\ S_5.$$

Vale decir, la familia de los géneros de sistemas es un árbol cuyas raíces están en S_1 y que en S_3 se ramifica en S_4 y S_5: véase la Figura 6.1.

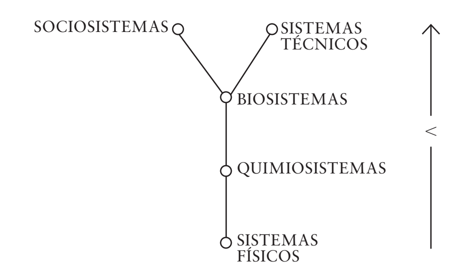


Figura 6.1. Las relaciones de precedencia entre géneros de sistemas.

La relación de precedencia $<$ es una relación de orden parcial. Por consiguiente, $\mathcal{S} = \langle S, < \rangle$ es un conjunto parcialmente ordenado. Podemos llamarle *estructura de sistemas del mundo* [o universo]. A menudo se la confunde con una jerarquía. Con todo, la diferencia entre los dos conceptos es clara: mientras que $\mathcal{S} = \langle S, < \rangle$ es el conjunto de los géneros de sistemas ordenados por la relación de precedencia (o emergencia), una jerarquía es un conjunto de cosas (o de conjuntos de cosas) ordenado por una relación de dominación. Además, por lo general, la tesis de que el universo posee una estructura jerárquica consiste en una forma de sobrenaturalismo, y la ciencia no la admite. En cambio, la tesis de que los sistemas concretos del mundo se distribuyen entre los S, así como que los géneros de sistemas superiores han emergido a partir de los géneros inferiores, es un componente de una ontología naturalista, sistemista, pluralista y dinamista.

6.5. El sistemismo supera al atomismo y al holismo

Los ocho postulados propuestos en la subsección previa se ajustan a los supuestos que ofrecimos en los capítulos anteriores y coronan nuestra versión del sistemismo. Esta ontología no debe confundirse con el holismo, o elogio romántico de la totalidad y la emergencia, perspectiva que hemos criticado en la Sección 4.2 del Capítulo 1. El motivo es éste: mientras que el holismo sostiene que debemos aceptar las totalidades y los emergentes con «reverencia» (Goethe) o «natural devoción» (Alexander), el sistemismo promueve los intentos de analizar los sistemas en términos de su composición, entorno y estructura, así como de desvelar los mecanismos de su formación y descomposición.

El requerimiento de explicaciones en términos de sistemas no debe confundirse con el reduccionismo ingenuo, es decir, la creencia de que lo único que necesitamos para dar razón de una totalidad es el conocimiento de sus partes. Esta creencia es errónea porque los sistemas poseen propiedades de las cuales sus componentes carecen y, por ende, no pueden descubrirse mediante el estudio de éstos de forma aislada. Para dar cuenta de la formación y persistencia de los sistemas, el análisis es necesario pero insuficiente: si deseamos comprenderlos, también debemos estudiar los sistemas en su propio nivel, así como sus interacciones con cosas de diferentes géneros. De eso precisamente se tratan las teorías de sistemas de diversas clases: físicas, químicas, biológicas, sociales y técnicas.

Podemos llamar *emergentismo racional* a la filosofía que combina el reconocimiento de la emergencia con la tesis de que ésta puede explicarse y predecirse, dentro de ciertos límites. Esta filosofía, prefigurada por Sellars (1922), supera tanto al atomismo (aunque mantiene su adhesión a la ciencia) como al holismo (aunque conserva su insistencia en la emergencia), e incorpora una teoría del conocimiento realista crítica, de la cual trataremos en los dos siguientes volúmenes de este *Tratado*.

6.6. Sinopsis

Ha llegado la hora de concluir. Lo haremos con una caracterización de la ontología ofrecida en este volumen, así como en su compañero, *El moblaje del mundo*, en términos de unos cuantos *ismos* tradicionales.

(Un solo *ismo* es malo porque es unilateral y rígido. La multilateralidad y la flexibilidad sólo pueden alcanzarse mediante un sistema de *ismos* congruentes).

Nuestra ontología se adhiere

(i) al *naturalismo* o *materialismo*, porque sólo admite existentes materiales y descarta las ideas independientes, los fantasmas y otros objetos por el estilo; pero no al *fisicalismo* (o *mecanicismo*), porque nuestra ontología niega que todas las cosas sean entidades físicas;

(ii) al *sistemismo*, porque sostiene que todo es o bien un sistema, o bien un componente de un sistema; pero no al *holismo*, porque nuestra concepción rechaza los mitos de que el todo es incomprensible, previo a sus componentes y superior a ellos;

(iii) al *pluralismo* respecto de la diversidad de cosas y procesos y, por ende, de la pluralidad de clases de cosas y de leyes; y también al *monismo* con respecto a la sustancia que posee las propiedades y experimenta los cambios (a saber, la materia), así como con respecto al número de universos (sólo uno);

(iv) al *emergentismo* con respecto a la novedad, ya que sostiene que si bien algunas propiedades globales son resultantes, otras son emergentes; pero no al *irracionalismo* respecto de la posibilidad de explicar y predecir la emergencia;

(v) al *dinamismo*, puesto que supone que todo está en flujo en algún aspecto, pero no a la *dialéctica*, dado que nuestra ontología rechaza los dogmas de que cada cosa es una unidad de opuestos y que todo cambio consiste en, o es causado por, una lucha o contradicción óntica;

(vi) al *evolucionismo* con respecto a la formación de sistemas de clases nuevas, porque sostiene que todo el tiempo surgen sistemas nuevos y son seleccionados por su entorno; pero ni al *gradualismo* ni al *saltacionismo*, puesto que reconoce tanto cambios continuos como saltos;

(vii) al *determinismo* respecto de sucesos y procesos, porque afirma que todos ellos son legales y que ninguno de ellos sale de la nada o desaparece sin dejar rastros; pero no al *causalismo*, ya que, además de los causales, admite como tipos de procesos el azar y la búsqueda de finalidades;

(viii) al *biosistemismo* con respecto a la vida, porque considera que los organismos son sistemas materiales que, aun cuando están compuestos por quimiosistemas, poseen propiedades que no se encuentran en otros niveles; pero ni al *vitalismo* ni al *maquinismo*;

(ix) al *psicosistemismo* en referencia a la mente, porque sostiene que las funciones mentales son actividades (procesos) emergentes de los sistemas neurales complejos; pero ni al *materialismo eliminativo* ni al *materialismo reduccionista*, ya que afirma que la mente, si bien puede explicarse por medio de premisas físicas, químicas, biológicas y sociales, es emergente;

(x) al *sociosistemismo* respecto de la sociedad, dado que sostiene que ésta es un sistema compuesto por subsistemas (la economía, la cultura, la organización política, etc.) y que tiene propiedades (tales como la estratificación y la estabilidad política) que no posee ningún individuo; por consiguiente, ni al *individualismo* ni al *colectivismo*, ni al *idealismo* ni al *materialismo vulgar*.

El lector acostumbrado a quedarse con un único *ismo*, o con ninguno, probablemente se rinda, desesperado, ante la pluralidad de *ismos* a la que nuestra ontología se adhiere. Permítanos, pues, decir lo siguiente en defensa de esa pluralidad. Primero, es posible sintetizar una variedad de *ismos* filosóficos, a condición de que no sean mutuamente inconsistentes, vale decir, siempre que el resultado sea un sistema conceptual coherente, en lugar de un ecléctico cajón de sastre. (Hemos intentado asegurar la coherencia mediante la adopción del formato axiomático). Segundo, es necesario adoptar (y desarrollar) diversos *ismos* filosóficos para dar cuenta de la variedad y mutabilidad de la realidad, a condición de que las diferentes tesis sean congruentes con la ciencia. Tercero, sólo es posible escapar totalmente a la tradición a riesgo de cometer injusticias y caer en la ignorancia: en lugar de descartar por completo nuestro legado filosófico, debemos enriquecerlo.

Apéndice A

Modelos de sistemas

Este apéndice constituye un repaso y un análisis filosófico de algunos modelos simples, pero útiles, de los sistemas concretos, independientemente de la naturaleza de sus componentes y, por ende, de la clase de vínculos que haya entre éstos. Los objetivos de esta presentación son (*a*) aclarar algunos conceptos clave utilizados en el texto, (*b*) ofrecer una provisión de ejemplos y (*c*) discutir algunos problemas de la todavía inmadura filosofía de la teoría de sistemas. Para los detalles, véase Ashby (1956), Athans y Falb (1966), Dorf (1974), Harrison (1965), Klir (1969), Klir y Valach (1967), Lange (1965), Padulo y Arbib (1974), y Zadeh y Desoer (1963).

1. Los modelos de entradas y salidas

1.1. La caja negra

El modelo más simple (o sea, más pobre) concebible de una cosa es una caja negra que no interacciona con su entorno. («Negra», porque no tiene estructura o no nos ocupamos de desvelarla). Este modelo, el de caja negra desnuda, ignora tanto la estructura interna de la cosa modelizada como sus acciones sobre otras cosas, así como las acciones que el entorno realiza sobre la primera. A pesar de su pobreza, se puede dotar a este modelo de varios atributos que repre-

sentan, presumiblemente, propiedades de la cosa real. La partícula clásica en movimiento libre y el sistema termostático completamente aislado son casos pertinentes.

A continuación, en orden de complejidad, está la caja negra propiamente dicha, dotada de terminales que se conectan a su entorno, el cual es tratado globalmente o como si estuviera compuesto por otras tantas cajas negras. La caja negra más simple sólo posee un terminal de entrada [*input*] que representa bien la acción (en un aspecto dado) del entorno sobre la cosa, o bien la reacción de la cosa (en el mismo aspecto o en otro diferente) sobre el entorno. El primer modelo representa una cosa pasiva, el segundo una cosa activa y a ambos se les llama *monopolos*. Puesto que, en realidad, no hay sistemas totalmente pasivos ni totalmente activos, el modelo de monopolos sólo es adecuado en casos extremos y cuando únicamente se tiene en cuenta una propiedad.

Un modelo más realista de la cosa es, desde luego, la caja negra dotada de un terminal de entrada y otro de salida [*output*], vale decir, un modelo sensible a (una parte de) su entorno y que, a su vez, actúa sobre (algunas características) del mismo. Le llamaremos *caja negra completa* o, para abreviar, *caja negra*. La caja negra más simple es sensible a estímulos de una única clase y admite sólo un estímulo por vez, es decir, posee un único terminal de entrada. Además, tiene un único terminal de salida, o sea que actúa sobre su entorno de un único modo y realiza una acción por vez. Este modelo, la caja negra más simple, se llama *dipolo*. Toda caja negra más compleja que ésta se llama *multipolo*: está dotada de cierto número de terminales de entrada de igual o diferente clase. Véase la Figura A1. Concentraremos nuestra atención en los dipolos, que constituyen los ladrillos para la construcción de todos los demás modelos de entradas y salidas de los sistemas.

Desde el punto de vista estrictamente formal, un dipolo es sólo una tabla de doble entrada de elementos (por ejemplo, números), o conjunto de pares ordenados $\langle u, v \rangle$, donde $u \in U$ es un valor de entrada y $v \in V$ el correspondiente valor de salida. En otras palabras, una caja negra de esta clase se reduce a una relación binaria f (tal vez una función) con un grafo o extensión $\mathscr{E}(f) \subset U \times V$, donde U es la colección de las entradas posibles y V la de salidas posibles. (Es lo que Mesarović (1968) llama *sistema general*. Pero se trata de un modelo de un sistema y, además, de uno que no es completamente general, ya que ignora la estructura interna del sistema).

El más simple de este tipo de modelos –o sea, el dipolo– tiene entradas y salidas del tipo sí/no: vale decir, los terminales están o bien encendidos (valor 1) o bien apagados (valor 0). O sea, $U = V = \mathbb{2} = \{0, 1\}$ y $f: \mathbb{2} \rightarrow \mathbb{2}$ es la *función de transferencia*. *Ejemplo 1* La caja conformista: $f(0) = 0$, $f(1) = 1$. *Ejemplo 2* La caja inconformista: $f(0) = 1$, $f(1) = 0$. *Ejemplo 3* La caja caprichosa (pero no caótica) o estocástica: $Pr(0 \mid 0) = p > 0 = 1$, $Pr(1 \mid 0) = 1 - p$, $Pr(0 \mid 1) = q > 0$, $Pr(1 \mid 1) = 1 - q$, donde p es la probabilidad de respuesta 0 al estímulo 0 y lo mismo para q. (Adviértase la diferencia entre la caja estocástica, caracterizada por valores de p y q constantes y, por ende, estadísticamente fiable, y una caja totalmente caótica, vale decir, una que carece de función de transferencia). Las tres cajas son modelos toscos de un especialista; el tercero modeliza el tipo creativo.

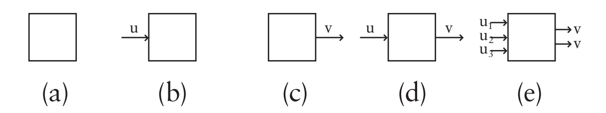


Figura A1. (*a*) La caja negra desnuda. (*b*) El monopolo pasivo, o sistema sin salidas. (*c*) El monopolo espontáneo, o sistema sin entradas. (*d*) El dipolo, o caja negra completa más simple. (*e*) El multipolo reactivo.

Otras cajas negras admiten corrientes de estímulos continuas y entregan corrientes continuas de salidas. O sea, sus funciones de transferencia son funciones continuas del tiempo. *Ejemplo 1* El diferenciador. El estado del sistema en el instante $t \in T$ es el par ordenado $\langle u(t), \dot{u}(t) \rangle$, donde $u : T \rightarrow \mathbb{R}$ y $\dot{u}$ es la tasa de cambio de u. El espacio de estados del sistema es $S = U \times V$, donde U es la imagen de u y V la de $v = \dot{u}$. *Ejemplo 2* La línea retardada. Aquí, $v(t) = u(t - \delta)$, con $\delta > 0$. Vale decir, la salida actual es igual a la entrada del instante anterior $t - \delta$. El espacio de estados es $S = U \times \{u(t - \delta) \mid t \in T\}$.

En los dos últimos ejemplos, los valores de entrada y salida fueron parametrizados con el tiempo, vale decir, interpretamos U y V como imágenes de funciones dependientes del tiempo. En general, el valor de salida $v(t)$ en el instante t dependerá no sólo del valor presente de la entrada (como en el Ejemplo 1), sino también de algunas, o aun de todas, las entradas que el sistema ha admitido previamente (como en el Ejemplo 2). Vale decir que, en general, el sistema tendrá *memoria* (o será *hereditario*). Una relación entrada-salida bastante general, que

abarca todos estos casos para el dipolo y que es fácilmente generalizable al multipolo, es

$$v(t) = \int_{-\infty}^{t} d\tau \, M(t, \tau) F(u(\tau)),$$

en la cual M resume la estructura de la caja (Bunge, 1963a). El dominio de integración, que se detiene en t, se ha escogido para ajustarse al principio de antecedencia (Postulado 6.12 de la Sección 5.3, Capítulo 6, del Volumen 3). Si M es una función delta, la caja carece de memoria. Si F es una función lineal, la fórmula anterior representa un dipolo lineal. En la gran mayoría de los casos, M no depende de t, sino sólo del pasado (si es el caso), y $F(u(\tau)) = u(t - \delta)$, donde δ es el retardo temporal [*time lag*]. En estos casos, la integral es la convolución de las dos funciones y la matemática se simplifica en buena medida.

1.2. Conexiones entre cajas negras

En términos estrictos, una caja negra es un modelo adecuado para un componente de un sistema, no para el sistema. En muchos casos, un sistema se puede modelizar adecuadamente como un ensamblado de cajas negras conectadas de forma apropiada. Los modos básicos de acoplamiento son los que siguen:

(i) *Acoplamiento en serie*: véase la Figura A2a. Si las dos cajas que lo componen están caracterizadas mediante las funciones de transferencia f: $U \to V$ y g: $V \to W$, entonces la caja resultante estará caracterizada por la composición $h = f \circ g$, con valores $w = g(f(u))$. Adviértase que, en general, la composición de funciones no es conmutativa, por lo que g podría filtrar todos los estímulos salvo los que pertenecen a cierto conjunto, a la vez que f sólo podría retardar las respuestas. *Ejemplo*: una planta (viviente o industrial) que elabora materiales producidos por otra planta g.

(ii) *Acoplamiento en paralelo*: véase la Figura A2b. Los dos componentes comparten la entrada, y la salida es la suma de las salidas parciales. Vale decir, $u = u_1 + u_2$ y $v = f(u_1) + g(u_2)$. Ejemplo: dos plantas industriales que consumen y producen mercancías semejantes al mismo tiempo.

(iii) *Acoplamiento por retroalimentación*: véase la Figura A2c. El sistema está acoplado consigo mismo de tal suerte que parte de su pro-

ducto es realimentado como insumo. O sea, $v = f(u) = v_1 + v_2$ y $u = u_1 + v_2$, donde ahora u_1 es la entrada externa (estímulo) y v la salida neta (respuesta), mientras que v_2 es la retroalimentación correctora.

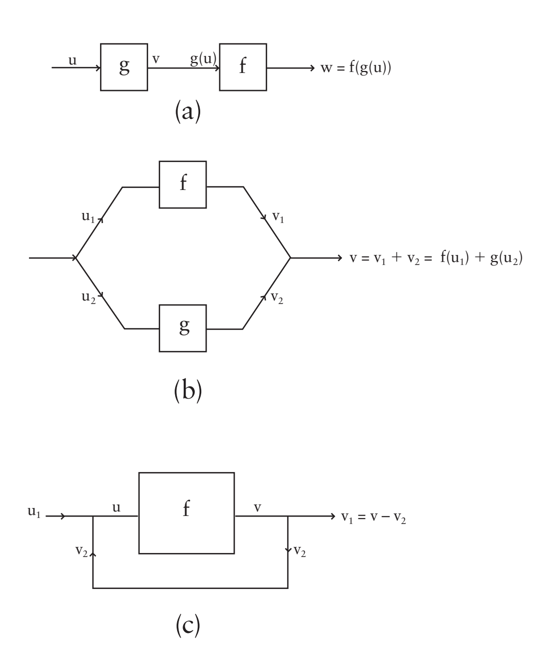


Figura A2. (*a*) Combinaciones en serie de dos dipolos. Ejemplo: el fabricante de telas *g* suministra al fabricante de vestimenta *f*. (b) Conexión en paralelo de dos dipolos. Ejemplo: dos sucursales de una fábrica de vestimenta. (c) Acoplamiento con realimentación (o autointerconexión). Ejemplo: sistema de control de la presión sanguínea.

Mediante la combinación de acoplamientos en tándem, en paralelo y por retroalimentación, es posible sintetizar cualquier sistema del tipo de entradas y salidas. Un ensamblado de cajas negras interconectadas no es, él mismo, una caja negra, sino que tiene propiedades emergentes. Una forma de representar el sistema resultante es listar todas las funciones de transferencia que caracterizan sus componentes cuando están interconectados, vale decir,

$$\mathbb{F} = \langle f_1, f_2, \ldots, f_n \rangle, \quad \text{donde} \quad f_i\colon U_i \to V_i.$$

Mientras que algunas de estas funciones representan terminales externos (o variables *exógenas*), otras representan terminales internos (o variables *endógenas*).

Los modelos de entradas y salidas se utilizan en diversos campos, desde la termodinámica y la ingeniería eléctrica (sus dos orígenes históricos) hasta la biología, la psicología y las ciencias sociales. (La mayor parte de lo que suele llamarse *análisis de sistemas* consiste en la construcción de esta clase de modelos). Su éxito ha alentado las creencias de que (*a*) todo sistema puede ser modelizado en su integridad mediante un modelo de entradas y salidas y (*b*) el universo, como totalidad, es un supersistema compuesto por multipolos. Pero se trata de ideas erróneas. (El dulce sueño del tecnólogo es la pesadilla del metafísico). En primer lugar, hay un gran número de sistemas que carecen de entradas y salidas reconocibles: piénsese, por ejemplo, en una onda de radio. En segundo lugar, en muchos casos necesitamos conocer la localización espacial de las partes de un sistema: el tiempo no basta. (Piénsese, nuevamente, en una onda de radio, en un cerebro o en una ciudad). Pese a ser factible y útil en numerosas áreas –especialmente en la tecnología– el análisis de entradas y salidas resulta demasiado pobre y es seguro que finalmente será complementado, o aun reemplazado, por un modelo más profundo y detallado. Así pues, la termodinámica es complementada con la mecánica estadística, la teoría de redes eléctricas con la electrodinámica, la psicología de estímulo-respuesta con la psicobiología, etc. (Para una valoración de las cajas negras y una crítica a la filosofía cajanegrista, véase Bunge, 1964).

1.3. Sistemas de control

Un sistema de control se compone de dos subsistemas: uno que es controlado, o subsistema ordinario, y otro que controla o regula la salida del primero, vale decir, un subsistema de control. El sistema de control actúa mediante la absorción de parte de la salida total y su realimentación en el sistema, de tal suerte que la entrada real resulta modificada y la salida neta difiere de la propia del sistema sin control. El sistema de control consta, a su vez, de dos componentes principales: el *detector de desequilibrios* (o *errores*) y el *mecanismo de respuesta*. Éste es estimulado por el primero de forma proporcional a la desviación

del estado presente del sistema controlado respecto del estado predeterminado, estado ideal o «final». En otras palabras, el detector se activa (tiene salida) cuando el sistema controlado está en un estado diferente al del estado predeterminado. Véase la Figura A3.

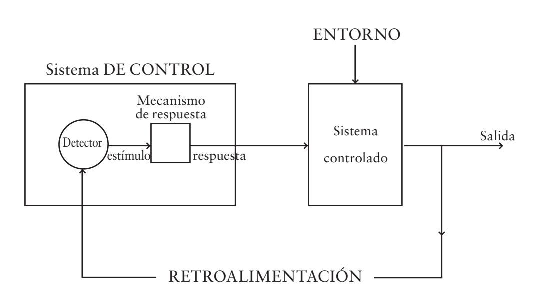


Figura A3. Sistema de control por retroalimentación. El detector compara la salida (el estado real) del sistema controlado y, si difiere del estado predeterminado, estimula el dispositivo de respuesta o corrector, el cual actúa sobre el sistema controlado para corregir el desequilibrio.

El estudio de sistemas de control específicos corresponde a las ciencias especiales, tales como las ingenierías mecánica y eléctrica, la bioquímica, la fisiología, la economía y la politología. Por su parte, el estudio científico de las características comunes a todos los sistemas de control, independientemente de su composición, es desde luego la cibernética (Wiener, 1948). Esta disciplina nació en la ingeniería de punta, pero dado que no depende de la clase de materiales que forman los sistemas en estudio, no supone ninguna ley física, química, biológica o social especial y, por ello, abarca todos los niveles. En consecuencia, se trata de una rama de la teoría general de sistemas, así como de la ontología científica.

El supersistema compuesto por el sistema controlado y el sistema de control puede describirse como sigue. La función de estado total del supersistema es

$$\mathbb{F} = \langle F_1, F_2, \ldots, F_p, F_{p+1}, F_{p+2}, \ldots, F_n \rangle : T \to \mathbb{R}^n,$$

donde las primeras coordenadas p son las llamadas *variables de estado* y los restantes componentes $n - p$ las *variables de control*. Estos componentes están sometidos a tres conjuntos de condiciones:

(i) las *restricciones* de las variables de estado (por ejemplo, sus valores deben estar dentro de cierta región del espacio de estados);

(ii) las *condiciones de control* o *gobierno* que especifican la manera en la cual las variables de control afectan a las variables de estado, por ejemplo,

$$\dot{F}_i = g_i(\mathbb{F}, t) \quad \text{para } 1 \leq i \leq p;$$

(iii) las *condiciones de optimización* de ciertas variables de estado (por ejemplo, la minimización del consumo de energía o la maximización de la tasa de producción de cierta sustancia).

Una buena manera de familiarizarse con la cibernética consiste en estudiar un sistema de control simple, tal como un integrador (por ejemplo, una calculadora de áreas), con control de retroalimentación. En ausencia de un controlador y si el sistema es inicialmente inerte, la ecuación de entradas y salidas es

$$\dot{v} = u, \quad \text{con} \quad v(t) = 0 \quad \text{para } t \leq 0.$$

Esto implica

$$v(t) = \int_0^t d\tau \, u(\tau),$$

de modo tal que el sistema integra la entrada. En particular, una entrada constante

$$u(t) = H(t) = \begin{cases} a \in \mathbb{R}^+ & \text{para } t \geq 0 \\ 0 & \text{para } t < 0 \end{cases}$$

es transformada en $v(t) = at$. Obviamente, a menos que sea regulada, esta salida finalmente se descontrolará. Se puede prevenir que esto ocurra mediante el acoplamiento del integrador a un controlador que desvía parte de la salida y la envía de regreso al terminal de entrada, de donde resulta un bucle cerrado: véase la Figura A4.

En el más simple de los casos, la fracción de salida $kv(t)$, en la cual $|k| < 1$, se realimenta, reducida pero sin distorsión, de forma tal que la ecuación de entradas y salidas ahora es

$$v = u + kv, \quad \text{con} \quad -1 < k < 1.$$

Si $k > 0$, la retroalimentación es *positiva*, vale decir, aumenta el efecto de la entrada, por lo que el sistema puede hacerse incontrolable. La realimentación es *negativa*, y de ello resulta un sistema estable, si regula la salida, es decir, si $k < 0$. Las soluciones para los casos de entrada constante $u= H(t)$ aplicados a $t > 0$ son

(i) para $k > 0$ (*retroalimentación positiva*)

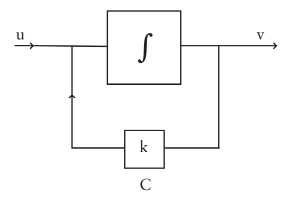


Figura A4. Integrador con control por retroalimentación. El efecto del subsistema de control C es la transformación de una entrada constante en una respuesta o bien con crecimiento exponencial (para $k > 0$), o bien con decrecimiento exponencial (para $k < 0$).

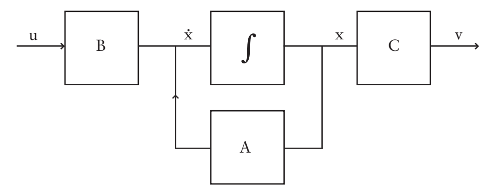


Figura A5. Sistema de control lineal.

$$v(t) = \frac{a}{k}(1 - \exp(kt) - 1) \quad \text{crecimiento exponencial;}$$

(ii) para $k < 0$ (*retroalimentación negativa*)

$$v(t) = \frac{a}{|k|}(1 - \exp(-|k|t)) \quad \text{crecimiento desacelerado tendente al valor predeterminado } a/|k|$$

Adviértase que hemos tratado ambos subsistemas, el controlado y el de control, como cajas negras: no hemos especificado sus mecanismos. Ni podríamos hacerlo sin incluir determinados enunciados legales (físicos, biológicos o lo que fuere).

El ejemplo anterior ilustra el modelo de caja negra de un sistema de control. En la mayoría de los casos, este modelo resulta insuficiente y se necesita un modelo de caja gris, o sea, uno que no sólo incluya un vector de entrada u y otro de salida v, sino también un vector de estado (interno) x. El ejemplo más simple de modelo de caja gris de un sistema de control es, desde luego, el sistema lineal

$$\dot{x} = Ax + Bu, \qquad v = Cx,$$

en el cual la matriz de estado A, la matriz de entrada B y la matriz de salida C son constantes. El diagrama de bloques correspondiente se muestra en la Figura A5.

1.4. Estabilidad y descomposición

Tal como hemos visto en la Sección 1.3, la retroalimentación puede ser positiva (aumentadora) o negativa (reguladora). Si es negativa, la realimentación puede corregir ciertos desajustes. Si es así, decimos que el sistema respectivo es *autoestabilizador*, ya que en este caso todos los componentes de su vector de estado se mantienen acotados todo el tiempo. Véase la Figura A6.

El equilibrio, por supuesto, puede ser estático o dinámico. En el primer caso, nada cambia, por lo cual el punto representante se mantiene fijo en el espacio de estados. (Pero, desde luego, no hay ningún sistema que permanezca en un estado de equilibrio estático eternamente, puesto que aun cuando sea internamente estable, todo sistema está sometido a influencias perturbadoras externas). En el caso del equilibrio dinámico, las trayectorias se mantienen dentro de cierta región limitada del espacio de estados. Las desviaciones a partir del equilibrio pueden ser regulares (por ejemplo, oscilaciones sinusoidales alrededor de un punto) o irregulares, en cuyo caso se llaman *fluctuaciones* u *oscilaciones estocásticas*. Un sistema puede oscilar en torno a una posición de equilibrio, ya sea de forma regular o de forma irregular; bien de manera espontánea (oscila-

ciones autoestimuladas), o bien bajo la acción de su entorno (oscilaciones forzadas). Si en lugar de mantenerse acotada o desvanecerse (amortiguamiento) la amplitud de la oscilación se incrementa con el transcurso del tiempo, el sistema será inestable y, finalmente, se descompondrá.

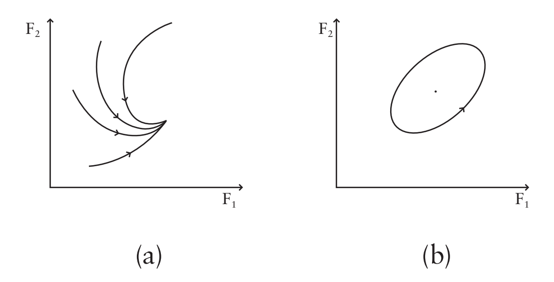


Figura A6. Dos clases de órbitas estables en el espacio de estados. (a) Aproximación en espiral al equilibrio estático. (b) Órbita estacionaria

Si la existencia de un sistema depende de manera decisiva de mantener sus propiedades dentro de ciertas cotas, entonces tendrá más oportunidades de «sobrevivir» si es autoestabilizante que si no lo es. Pero, desde luego, hasta un sistema de esta clase puede ser objeto de perturbaciones externas tan intensas que lo lleven lejos del equilibrio de forma permanente y, finalmente, a su descomposición. Si los parámetros de los componentes de control (por ejemplo, umbrales, retardos, rigidez) son rígidos (constantes), luego es posible que el sistema no pueda soportar entradas elevadas, vale decir, puede que no se adapte a las nuevas circunstancias. La única oportunidad que tiene un sistema de soportar impactos ambientales intensos, dentro de ciertos límites, es la que le ofrece la variación de sus parámetros según lo requieran las condiciones; por ejemplo, un aumento de algunos de sus umbrales para alargar ciertos retardos, una disminución de la rigidez o una variación de otros parámetros cualesquiera de tal forma que su totalidad o integridad sea preservada. Un sistema «plástico» como éste puede evaluar su propio desempeño y ajustar algunas de sus propiedades de tal modo que sus salidas se mantengan dentro de los límites propios de la estabilidad. Lejos de ser un juguete pasivo de su entorno, un sistema de esta clase se adapta activamente a aquél y con ello consigue subsistir. Puesto que tales sistemas son de enorme importancia en las ciencias de la vida, así como en las ciencias sociales –por no mencionar la tecnología– merecen tener un nombre que los distinga:

DEFINICIÓN A1 Un sistema de control por retroalimentación negativa que cambia algunos de sus parámetros de tal suerte que se mantiene estable en presencia de un entorno cambiante, se llama sistema *autogobernado*, *autocontrolado*, *autónomo*, *adaptativo* o *plástico*.

¿Qué ocurre si un sistema se torna inestable? Hay dos posibilidades: si es rígido, sufre una *descomposición estructural*, vale decir, su destrucción. La desintegración y la fisión nucleares, el estallido de una parte de una red de cualquier clase, la muerte de un organismo y la extinción de una biopoblación o de un ecosistema ilustran casos de descomposición estructural. En cambio, si el sistema es plástico, decimos que sufre una *descomposición funcional*, es decir, que se transforma en un sistema estable de otra clase. Por ejemplo, un aislante sometido a un voltaje por encima de cierto valor se transforma en un conductor; un hombre en estado de choque puede perder ciertos recuerdos inquietantes; una sociedad puede hacerse viable mediante la modernización de su tecnología, o desembarazándose de sus parásitos. En todo caso, la inestabilidad –temida, normalmente, por el ingeniero– resulta de interés para el científico y para el filósofo, porque a menudo está en la base de la novedad radical. En otras palabras, la descomposición funcional puede dar como resultado un desarrollo estructural o morfogénesis.

2. Los modelos de caja gris

2.1. Generalidades

Tómese una caja negra y obsérvense o conjetúrense sus estados internos, sin desvelar, empero, el mecanismo que la hace funcionar: ya se tiene una caja gris. Los psicólogos dicen que se ha añadido una *variable interviniente* a los pares estímulo-respuesta y que la nueva variable no es un «constructo hipotético» sino sólo un enlace formal entre entradas y salidas. Pero si se interpreta que la variable interviniente representa el mecanismo que transforma las entradas en salidas, en lugar de una caja gris tenemos una cada dinámica (Apéndice B, Sección 1). Una caja gris está a medio camino, en cuanto a profundidad, entre una caja negra y una caja traslúcida o modelo mecanísmico. Podemos representarla como una caja provista de una escalera, cada escalón de la cual representa un estado del sistema: véase la Figura A7.

De todas las teorías de caja gris, puede que la más simple sea la teoría de autómatas (Arbib, 1969; Ginsburg, 1962; Ginzburg, 1968; Harrison, 1965; McNaughton, 1961; Rabin y Scott, 1959; Rabin, 1963). Según lo idealiza esta teoría, un autómata es un sistema de un componente que admite entradas de cierta clase (por ejemplo, cartas perforadas) y produce salidas de igual o diferente clase, tales como símbolos impresos. El autómata salta de un estado a otro en respuesta a las entradas que admite o, por lo menos, bajo su influencia. Se da por supuesto que entradas, estados internos y salidas son numerables. En resumen, un autómata es un sistema discreto y secuencial. Si carece de espontaneidad, vale decir, si actúa únicamente forzado por las entradas, se dice que el autómata es *determinista*. Si las entradas y los estados internos sólo determinan las probabilidades de las salidas del autómata, entonces lo llamamos *probabilístico*. Los autómatas deterministas tienen interés principalmente en la tecnología, donde son deseables sistemas de elevada fiabilidad. Los autómatas probabilísticos son de mayor interés científico y filosófico, ya que los sistemas naturales, tales como los cerebros y las comunidades, están provistos de cierta espontaneidad y, al parecer, poseen fuertes componentes estocásticos.

Los autómatas son más interesantes que los modelos de caja negra porque, a diferencia de éstos, no sólo tienen en cuenta el comportamiento, sino también los estados internos del sistema. Por consiguiente, un modelo de un autómata puede tener éxito (vale decir, ser verdadero) allí donde un modelo de caja negra tiene que fracasar (es decir, ser falso), a saber, (*a*) cuando un estímulo suscita diferentes respuestas dependientes del estado del sistema o (*b*) cuando el sistema posee salidas espontáneas (no causadas). Pero, desde luego, los modelos de autómatas comparten con los de caja negra la falta de interés del modelador por la naturaleza específica de la cosa modelizada y hasta por la configuración espacial de sus componentes. En otras palabras, la teoría de autómatas es una teoría global (pero no holística), independiente del material (pero no de la materia), atópica (no espacial) y ácrona (atemporal). Al ser tan extremadamente pobre, es aplicable a toda clase de sistemas. (Tal vez por eso von Neumann –1951– la confundió con una rama de la lógica formal).

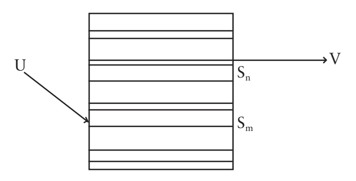


Figura A7. Transición del sistema, del estado S_m al estado S_n bajo la influencia de la entrada *u*.

Todos los sistemas de procesamiento de la información –los sistemas nerviosos, los servomecanismos, los ordenadores, las cadenas de TV, etc.– pueden considerarse autómatas, por lo menos en una primera aproximación. Por consiguiente, el referente de la teoría de autómatas no es una especie restringida de sistemas, sino todo el género de los sistemas de procesamiento de la información, sean éstos físicos, químicos, vivientes o sociales. Y puesto que la teoría se ocupa de ciertas características de los sistemas concretos, no es una teoría formal sino una teoría fáctica. En efecto, proporciona un modelo exacto y simple (y, por ello, superficial) de un sistema en interacción con su entorno, independientemente de toda característica específica que sea del interés de las ciencias especiales, tales como la clase de material que lo constituye y la manera en que obtiene su energía. Por esta razón, la teoría de autómatas no sólo pertenece a la tecnología de punta, sino también a la ontología. Por consiguiente, echémosle un rápido vistazo.

2.2. Los autómatas deterministas

La teoría de autómatas presupone únicamente la lógica tradicional, los conceptos de conjunto y función, y un poco de álgebra abstracta: no se basa en ningún cuerpo de conocimiento fáctico; en particular, no contiene ningún enunciado legal tomado de otras teorías. Los conceptos específicos definitorios (primitivos) de la teoría de autómatas deterministas se recogen en la Tabla A1.

Los conceptos anteriores se interrelacionan y se precisan en la axiomática.

TABLA A1
Conceptos básicos de la teoría de autómatas deterministas

Símbolo	Naturaleza matemática	Interpretación fáctica
Σ	Conjunto	Conjunto de entradas unitarias distintas
Ω	Conjunto	Conjunto de salidas unitarias distintas
σ_0	Individuo	Entrada nula o pausa
$\circ$	Operación binaria	Concatenación
S	Conjunto	Espacio de estados
M	Función	Función de transición (de estados)
N	Función	Función de salida
s_0	Individuo	Estado inicial
F	Conjunto	Conjunto de estados finales

DEFINICIÓN A2 La estructura $\mathscr{A} = \langle \Sigma, \Omega, \sigma_0, \circ, S, M, N, s_0, F \rangle$ representa un *autómata determinista finito* (o *máquina de secuencia con salida*) A sii

(i) $\Sigma = \{\sigma_0, \sigma_1, \ldots, \sigma_k\}$, llamado *alfabeto de entrada*, es un conjunto no vacío con $k + 1$ elementos llamados *letras* [símbolos o caracteres], cada uno de los cuales representa una entrada unitaria de A proveniente del entorno;

(ii) Ω, llamado *alfabeto de salida*, es un conjunto de dos elementos: 0 y 1, de los cuales 0 representa la ausencia de salidas y 1 una salida unitaria;

(iii) sea Σ^* el conjunto de cadenas finitas, llamadas *cintas*, de elementos de Σ (es decir, de letras) y sea $\sigma_0 \in \Sigma$, tal que para toda cinta $x \in \Sigma^*$, $\sigma_0 x = x\sigma_0 = x$. Asimismo, sea Ω^* el conjunto de cadenas finitas de elementos de Ω, con $0 \in \Omega$, tal que, para todo $y \in \Omega^*$, $0y = y0 = y$. Las estructuras $\langle \Sigma^*, \circ, \sigma_0 \rangle$ y $\langle \Omega^*, \circ, 0 \rangle$ son monoides libres; $\circ$ representa la combinación o concatenación de sucesivas entradas y salidas de A;

(iv) S, llamado *espacio de estados* de A, es un conjunto no vacío finito con n elementos, en el cual $n > 1$; cada miembro de S representa un estado interno de A;

(v) la función $M: S \times \Sigma^* \to S$ se llama *función de transición* (*de estados*); si $s \in S$ y $x \in \Sigma^*$, luego, $M(s, x) \in S$ representa el estado hacia el que va A cuando, estando en el estado s, A admite la entrada x;

(vi) la función $N: S \times \Sigma^* \to \Omega^*$ se llama *función de salida* y es tal que $N(f, x) = 1 \in \Omega^*$ para todo $f \in F \subset S$ y todo $x \in \Sigma^*$, donde $N(s, x)$

representa la salida de *A* cuando actúa sobre la entrada $x \in \Sigma^*$ mientras está en el estado *s*;

(vii) s_0 es un elemento distinguido de *S* que representa el estado interno inicial de *A*;

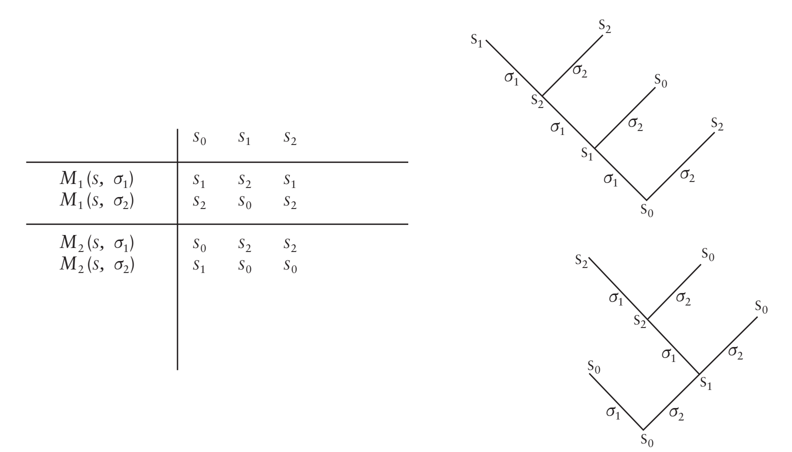
(viii) *F* es un conjunto no vacío incluido en el espacio de estados de *S*, y todo miembro *f* de *F* representa un estado meta de *A*;

(ix) *A* no experimenta transiciones espontáneas; vale decir, la entrada nula no tiene efecto alguno sobre *A*: para todo *s* perteneciente a *S*, $M(s, \sigma_0) = s$;

(x) los estados internos forman secuencias, vale decir, el efecto de una entrada compuesta $x \circ y$, donde $x, y \in \Sigma^*$, es igual al efecto que tiene la segunda entrada al actuar sobre el autómata cuando está en el estado al que lo condujo la primera entrada:

$$M(s, x \circ y) = M\,(M(s, x), y).$$

Los dos últimos supuestos son componentes esenciales de la Definición A2. Caracterizan toda una clase de funciones de transición de estados y afirman que un autómata determinista opera únicamente si recibe estimulación externa y que lo hace de forma secuencial y determinada. Nada se dice acerca del detalle de la estructura del sistema, mucho menos de su física y su química: éste es el motivo de que la teoría de autómatas tenga un espectro tan amplio de aplicaciones.



	s_0	s_1	s_2
$M_1(s, \sigma_1)$	s_1	s_2	s_1
$M_1(s, \sigma_2)$	s_2	s_0	s_2
$M_2(s, \sigma_1)$	s_0	s_2	s_2
$M_2(s, \sigma_2)$	s_1	s_0	s_0

Figura A8. Dos diferentes autómatas con tres estados, cada uno caracterizado por una función de transición diferente (M_1 y M_2 respectivamente), sometidos al mismo estímulo.

Ejemplos Las tablas y diagramas de transición de estados de la Figura A8 caracterizan dos autómatas diferentes, con los mismos estados internos, que reaccionan de manera diferente a las mismas entradas unitarias σ_1 y σ_2. Por consiguiente, pueden representar cierta característica del comportamiento de dos insectos diferentes que se encuentran en las mismas circunstancias.

A fin de mostrar algunas consecuencias de la definición axiomática de autómata determinista, necesitamos un par de convenciones. Primero, la

DEFINICIÓN A3 Sea $\mathscr{A} = \langle \Sigma, \Omega, \sigma_0, \circ, S, M, N, s_0, F \rangle$ que representa un autómata A. Luego

(i) la restricción de la función de transición M a s_0 se llama *función de respuesta*: $rp(x) = M\,(s_0, x)$, para x $\in \Sigma^*$;

(ii) un estado $s \in S$ de A es *accesible* sii existe una entrada $x \in \Sigma^*$ tal que $s = rp(x)$; de lo contrario, s es *inaccesible;*

(iii) una cinta $x \in \Sigma^*$ es *admitida* (o *reconocida*) por A sii $rp(x) \in F$ (es decir, si x posee un efecto manifiesto cuando actúa sobre A en s_0);

(iv) el *comportamiento* de A es el conjunto de todas las cintas admitidas (o reconocidas) por A: $\beta(A) =_{df} \{x \in \Sigma^* \mid rp(x) \in F\}$;

(v) dos autómatas A y A' son *comportamentalmente idénticos* sii $\beta(A) = \beta(A')$.

Adviértase la diferencia entre la noción anterior de comportamiento y la que se utiliza en las llamadas ciencias del comportamiento.

Y a continuación, unas cuantas consecuencias características. Primero, el

TEOREMA A1 Si dos entradas $x, y \in \Sigma^*$ tienen el mismo efecto, luego, los efectos de las entradas compuestas xz e yz son los mismos para una cinta arbitraria $z \in \Sigma^*$. Vale decir, para todos los estados $s \in S$ y todas las entradas $x, y, z \in \Sigma^*$,

$$M\,(s, x) = M\,(s, y) \Rightarrow M\,(s, x \circ z) = M\,(s, y \circ z).$$

COROLARIO A1 Para toda cinta $x, y, z \in \Sigma^*$,

$$rp(x) = rp(y) \Rightarrow rp(xz) = rp(yz).$$

TEOREMA A2 Todo estado accesible de un autómata que es respuesta a una entrada cuya longitud es, por lo menos, igual al número de estados del sistema, también puede ser producido por una entrada de menor longitud. En otras palabras: si A tiene n estados y si $s = rp(x)$ es un estado accesible de A para cierta cinta x compuesta por $m \geq n$ símbolos unitarios, luego, existe otra cinta y, tal que $rp(y) = s$ y cuya longitud es menor que m.

TEOREMA A3 Todo estado accesible de un autómata con n estados es una respuesta a cierta entrada de menor longitud que n.

Definamos, a continuación, el concepto de analogía de autómatas:

DEFINICIÓN A4 Sea $\mathscr{A} = \langle \Sigma, \Omega, \sigma_0, \circ, S, M, N, s_0, F \rangle$ y $A' = \langle \Sigma', \Omega', \sigma_{0'}, \circ, S', M', N', s_0', F' \rangle$ que representan los autómatas finitos A y A' respectivamente. Luego,

(i) A y A' son *homomorfos* sii existe una función φ de $\mathscr{A}$ a $\mathscr{A}'$, tal que

(a) $\varphi: \Sigma^* \cup S \rightarrow \Sigma'^* \cup S'$;

(b) para todo u de $\Sigma^* \cup S$: si $u \in S$, luego, $\varphi(u) \in S'$;

(c) $\varphi(s_0) = s'_0$;

(d) para todo t de $\Sigma^* \cup S$: si $t \in F$, luego, $\varphi(t) \in F'$;

(e) para todo s de S y todo σ de Σ: $\varphi(M(s, \sigma)) = M'(\varphi(s), \varphi(\sigma))$, $\varphi(N(s, \sigma)) = N'(\varphi(s), \varphi(\sigma))$;

(ii) A y A' son *isomorfos* sii φ es biyectiva;

(iii) A y A' son *estructuralmente equivalentes* sii son isomorfos;

(iv) el conjunto de todos los autómatas isomorfos a un autómata dado A se llama *tipo estructural* de A.

Puede demostrarse que si existe un homomorfismo de un autómata a otro, entonces es único. (Lo mismo es válido, con mayor razón, para los isomorfismos). Las condiciones necesarias y suficientes para el homomorfismo y el isomorfismo se formulan en términos de la

DEFINICIÓN A5 Una relación de *equirrespuesta* $\sim_A$ sobre el conjunto Σ^* de cintas es una relación binaria sobre Σ^*, tal que para todo $x, y \in \Sigma^*$,

$$x \sim_A y \text{ sii } rp(x) = rp(y).$$

Si usamos la Definición A4 de homomorfismo, es posible demostrar el

TEOREMA A4 Sean A y A', autómatas. Luego, existe un homomorfismo de A a A' sii la extensión de $\sim_A$ está incluida en la de $\sim_{A'}$ y el comportamiento de A está incluido en el de A'.

COROLARIO A2 Dos autómatas son isomórficos sii las extensiones de sus relaciones de equirrespuesta coinciden y sus comportamientos son iguales.

2.3. Los autómatas probabilísticos

La teoría de autómatas probabilísticos posee el mismo trasfondo formal que la de los autómatas deterministas, más la teoría de probabilidades elemental (discreta). Sus fundamentos están resumidos en la

DEFINICIÓN A6 La estructura $\mathcal{P} = \langle \Sigma, \Omega, \sigma_0, \circ, S, M, N, s_0, F \rangle$ representa un *autómata probabilístico finito P* sii todas las coordenadas de $\mathcal{P}$, salvo M, satisfacen las cláusulas de la Definición A2 y M es, ahora, una función de $S \times \Sigma$ al intervalo real $[0, 1]^{n+1}$, llamada *tabla de probabilidades de transición*, tal que para todo estado $s \in S$ y símbolo $\sigma \in \Sigma$,

$$M(s, \sigma) = \langle p_0(s, \sigma), p_1(s, \sigma), \ldots, p_n(s, \sigma) \rangle$$

donde

(i) las $p_i(s, \sigma)$, para $i = 0, 1, \ldots, n$, son probabilidades sometidas a la condición

$$\Sigma_i p_i(s, \sigma) = 1 \quad \text{para todo } \sigma \in \Sigma;$$

(ii) $p_i(s, \sigma)$, para $i = 0, 1, \ldots, n$, mide la intensidad de la disposición o propensión de que el autómata P, cuando está en el estado s y sobre él actúa un estímulo unitario σ, salte al estado $s_i \in$ S.

Dado que ahora la función de transición es una probabilidad, no sólo hemos renunciado al comportamiento determinado del sistema, sino también al carácter serial o secuencial de sus operaciones. La teoría, por tanto, describe el comportamiento posible, no el real, del sistema. Cómo ocurre esto se infiere a partir de lo que sigue.

Hasta aquí nos hemos ocupado únicamente de símbolos o entradas unitarios. A fin de tratar con las cintas, o palabras, necesitamos un elemento de notación más:

DEFINICIÓN A7 La *matriz estocástica* asociada a una entrada unitaria $\sigma \in \Sigma$ es

$$P(\sigma) = \|p_j(s_i, \sigma)\|, \quad \text{con } i, j = 0, 1, \ldots, n.$$

El resultado principal respecto de la probabilidad asociada a una cinta o palabra expresa la independencia estadística de los efectos con respecto a sus componentes:

TEOREMA A5 La matriz estocástica de una entrada $x = \sigma_p\sigma_q \ldots \sigma_r$ es igual al producto de las matrices estocásticas de los componentes unitarios de la cinta:

$$P(\sigma_p\sigma_q \ldots \sigma_r) \equiv \|p_j(s_i, \sigma_p\sigma_q \ldots \sigma_r)\| = P(\sigma_p) \cdot P(\sigma_q) \ldots P(\sigma_r).$$

DEFINICIÓN A8 Sea $\mathscr{P} = \langle \Sigma, \Omega, \sigma_0, \circ, S, M, N, s_0, F\rangle$ que representa un autómata P y sea $I = \{i_0, i_1, \ldots, i_r\} \subset \mathbb{N}$ un conjunto de índices utilizado para etiquetar los estados finales, es decir, el conjunto $F = \{s_{i0}, s_{i1}, \ldots, s_{ir}\}$. La *probabilidad de que la cinta* $x \in \Sigma^*$ *sea admitida* (reconocida) por P cuando está en s_0, es

$$p(x) = \sum_{i \in I} p_i(s_0, x).$$

Ejemplo Sea $\Sigma = \{\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2\}$, $S = \{s_0, s_1\}$, $F = \{s_1\}$ y supongamos las matrices estocásticas

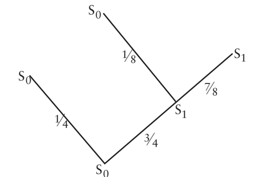
$$P(\sigma_1) = \left\|\begin{matrix} 1 & 0 \\ ½ & ½ \end{matrix}\right\| \qquad P(\sigma_2) = \left\|\begin{matrix} ½ & ½ \\ 0 & 1 \end{matrix}\right\|.$$

Luego, la tabla de probabilidades de transición para la cinta $x = \sigma_1\sigma_2\sigma_2$ es

$$P(\sigma_1 \sigma_2 \sigma_2) = P(\sigma_1) \cdot P(\sigma_2) \cdot P(\sigma_2) = \begin{Vmatrix} 1/4 & 3/4 \\ 1/8 & 7/8 \end{Vmatrix}$$

$$= \begin{Vmatrix} p_0(s_0, x) & p_1(s_0, x) \\ p_0(s_1, x) & p_1(s_1, x) \end{Vmatrix}.$$

El correspondiente diagrama en el espacio de estados es



Sólo puede calcularse el conjunto probable de comportamientos de un autómata probabilístico: su comportamiento real solamente puede ser descrito después de ocurrido el suceso. Sin embargo, si las diversas probabilidades de transición son notablemente diferentes unas de otras, es posible anticipar el comportamiento más probable de un autómata si se consideran las entradas que tienen ciertas oportunidades de ser admitidas y se ignora el resto. Más precisamente, se puede escoger el número real situado entre 0 y 1, llamado *punto de corte*, debajo del cual todas las probabilidades pueden dejarse a un lado, con cierto riesgo, desde luego. En otras palabras, podemos usar la

DEFINICIÓN A9 Sea P un autómata probabilístico y sea r un número real, tal que $0 \leq r \leq 1$. Luego, el *comportamiento más probable* (el punto de corte) r es

$$\beta r(P) = \{x \in \Sigma^* \mid p(x) > r\}.$$

En lo que respecta a su comportamiento, la relación entre autómatas probabilísticos y autómatas deterministas, está dada por el

TEOREMA A6 *P* es un autómata determinista sii $\beta r(p) = \beta(P)$ para todo r, tal que $0 \leq r < 1$.

Éste no es más que un caso de un importante metateorema que no tiene demostración conocida, a saber: *Toda teoría estocástica incluye una subteoría determinista*.

2.4. Los sistemas de información

Nuestro último ejemplo de modelo caja gris será el de los sistemas de información. Las señales que llegan a un autómata, sean deterministas, sean probabilísticas, lo conducen de un estado al siguiente; bien de manera invariable, o bien con cierta probabilidad, sin modificar el conjunto de sus estados finales posibles. En cambio, si algunas entradas pueden modificar –por ejemplo, expandir o reducir– el subconjunto de estados finales del espacio de estados de un sistema, éste no cumple las condiciones de un autómata, sino las propias de un *sistema de información*. Vale decir, un sistema de información es un sistema que puede adquirir o perder algunos estados finales en respuesta a ciertos estímulos externos. Si éstos poseen el efecto mencionado, se les llama *señales* o *mensajes*, y a cada uno de ellos se le puede asignar una cantidad de información definida que mide el efecto del mensaje en el sistema.

Huelga decir que todo mensaje es transportado por cierto portador o canal de información y que todo incremento o pérdida de la información supone cierta cantidad de energía. Sin embargo, la teoría general que se ocupa de los sistemas de información no se interesa por las características físicas ni del sistema ni del mensaje, ni siquiera del aspecto energético del intercambio: se centra, en cambio, en el cambio neto del número de estados finales (o salidas) de un sistema modificado por un mensaje, independientemente de su naturaleza. Tanto es así que considera el emisor, el canal y el receptor como partes atómicas del sistema y no incluye ninguna variable física. Véase la Figura A9. (En la literatura popular sobre la información, a menudo se afirma que una entrada que llega a un sistema se llama *señal* sii provoca una salida cuya energía es mucho mayor que la energía de la entrada. Con todo, la teoría de la información no contiene el concepto de energía, por lo cual esta difundida caracterización es inadecuada).

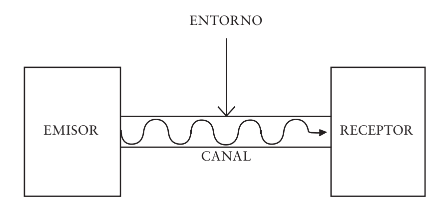


Figura A9. Los componentes de un sistema de información. Los efectos del entorno en el canal, cuando son aleatorios, se agrupan en la categoría de ruido.

Pensemos, pues, en un sistema con n estados finales posibles y un mensaje que llega al sistema, mensaje cuyo efecto reduce el número de alternativas de n a cierto número $m \leq n$. Se considera que la *cantidad de información* transportada por el mensaje es igual a $\log_2(n/m)$ bits. (El *bit* es, desde luego, la unidad de información, es decir, la cantidad de información obtenida por el sistema cuando el número de alternativas se ha reducido a la mitad. De hecho, en este caso, $\log_2(n/(n/2)) = \log_2 2 = 1$). En pocas palabras, si el mensaje reduce el número de estados finales del sistema de n a $m < n$, se dice que transporta la cantidad de información $I = \log_2(n/m)$. No tiene por qué haber nada cognitivo, y mucho menos subjetivo, en este concepto de información.

Si el caso es que las señales son aleatorias, ya sea porque son generadas de forma aleatoria o, más comúnmente, porque el canal de información está sometido a perturbaciones aleatorias, entonces vale la teoría estadística de la información (Shannon y Weaver, 1949). La noción básica de esta teoría es la de una señal física binaria aleatoria que aparece en el extremo receptor de un sistema de comunicación. El postulado central de la teoría es que la cantidad de información de una señal es $I = \log_2(1/p)$, donde p es la probabilidad de que la señal llegue al receptor. Si se da el caso de que éste sea un ser inteligente, se interpreta I como el grado de incertidumbre del mensaje. Pero esta interpretación, por más que sea legítima en algunas aplicaciones de la teoría estadística de la información a la psicología, no es pertinente para las comunicaciones, la ingeniería, la biología molecular y la semántica.

Por último, una advertencia. Hay quienes afirman que la información mide la organización. El argumento es como sigue: un sistema determinista es predecible, por lo cual la observación de su comportamiento no proporciona información; en cambio, un sistema probabilístico es impredecible, con lo cual todo lo que haga resultará sorprendente o

informativo. Por consiguiente, cuanto más desorganizado sea un sistema, más informativa resultará la observación que de él se realice. Este argumento tiene varios errores importantes. En primer lugar, la función de información no está definida para un conjunto de sistemas (o de estados de un sistema), sino para el par sistema-mensaje. En consecuencia, cierta cantidad de información, lejos de ser una propiedad intrínseca de un sistema (por ejemplo, de una molécula de ARN de transferencia), es una propiedad mutua del sistema y el mensaje. Por ello no puede ser una medida del grado de organización de un sistema ni de ninguna otra de sus propiedades intrínsecas. En segundo lugar, los sistemas no son ni predecibles ni impredecibles: todo lo que pueda ser predecible, lo es mediante el uso de teorías y datos. El predicado «predecible» no está definido para el conjunto de los sistemas, sino para el conjunto de pares ⟨cuerpo de conocimientos, sistema⟩. En tercer lugar, no se debe confundir la predicción con la predicción determinista. Si un sistema es estocástico –tal como ocurre en los casos de un átomo, un sistema que aprende o un grupo social– entonces su comportamiento puede predecirse estadísticamente, a condición de que hayamos conseguido construir una teoría probabilística verdadera acerca del mismo. En este caso, puede que seamos capaces de predecir probabilidades (por ejemplo, transiciones) y diversas propiedades derivadas de ellas, tales como promedios y desviaciones estándar. En cuarto lugar, un sistema estocástico –tal como un autómata probabilístico– no es caótico: puesto que es probabilístico está «gobernado» por leyes probabilísticas. En consecuencia, si bien un átomo es estocástico, no es caótico como lo es mi escritorio para el cual no es posible definir ninguna distribución de probabilidades. (Para la diferencia entre aleatoriedad y caos, véase el Volumen 3, Capítulo 4, Sección 6.4).

En conclusión, la información no mide la organización. Y, al parecer, no hay una medida mejor, tal vez porque la organización es una propiedad sumamente compleja que no admite que se la englobe en un único número. Lo que sí tenemos son medidas de eficiencia, tales como la eficiencia termodinámica, las razones insumo/producto o las razones señal/ruido. Cuando sabemos que un sistema es muy (o bastante o muy poco) eficiente, podemos inferir si está muy (o bastante o muy poco) organizado para lograr cierta finalidad o ayudarnos a realizar cierta tarea. Pero la eficiencia es un indicador de la organización, no una medida de esta propiedad.

Apéndice B

Modelos de cambio

En este Apéndice pondremos el acento en el cambio. Presentaremos tanto modelos cinemáticos como modelos dinámicos, primero de cambio cuantitativo, después de cambio cualitativo. Sólo estudiaremos modelos de cambio sumamente generales, vale decir, aquéllos que son transportables de un campo de investigación a otro. Como en el caso del Apéndice A, la mayor parte del material ofrecido es estándar o, por lo menos, ha sido presentado con anterioridad. Con todo, su interpretación y análisis filosófico son, con frecuencia, novedosos.

1. Modelos cinemáticos

1.1. Cinemática global

Un modelo cinemático de un sistema es una teoría que representa el cambio, paso a paso, de algunas de las propiedades del sistema. El modelo cinemático más simple supone que las propiedades del sistema pueden representarse mediante funciones continuamente diferenciables y que la colección de todas ellas, vale decir, la función de estado, es una función dependiente del tiempo con valores de $\mathbb{R}^n$ que obedecen una ecuación de evolución de la forma

$$\dot{\mathbb{F}} = \mathbb{G}(\mathbb{F}, t).$$

Ejemplo La tasa de cambio de la función de estado es una combinación lineal de sus propios componentes, vale decir, $\mathbb{F} = G \cdot \mathbb{F}$, donde G es una matriz cuadrada con coeficientes independientes del tiempo. La solución es $\mathbb{F}(t) = e^{Gt} \cdot \mathbb{F}(0)$, donde $\mathbb{F}(0)$ es el valor de la función de estado en $t = 0$.

Algunos componentes de $\mathbb{G}$ pueden mantenerse constantes en el transcurso de la evolución del sistema. En este caso, se les llama *invariantes* (temporales) o *constantes de movimiento* del sistema. Si todos los n componentes de $\mathbb{G}$ son nulos, el sistema tiene n constantes de movimiento y siempre se encuentra en un estado estacionario, aun cuando sus componentes pueden no estar en ese estado.

Otra propiedad sistémica o global que puede estudiarse mediante un modelo cinemático es la estabilidad. Un sistema representado por una ecuación de estado de la forma $\dot{\mathbb{F}} = \mathbb{G}(\mathbb{F}, t)$ está (*a*) en un *estado estacionario* (o en *equilibrio*) durante cierto intervalo temporal sii $\dot{\mathbb{F}} = 0$ durante ese intervalo (de modo tal que $\mathbb{F}$ es igual a una n-tupla constante); (*b*) *asintóticamente estable* sii $\mathbb{F}$ se acerca a un valor de equilibrio para valores cada vez mayores de t.

Ejemplo Supongamos que un sistema está caracterizado por sólo dos propiedades, representadas por F_1 y F_2, de modo tal que sus ecuaciones de evolución son

$$\dot{F}_1 = G_1(F_1, F_2, t), \qquad \dot{F}_2 = G_2(F_1, F_2, t).$$

Podemos encontrar la propiedad de equilibrio si examinamos el espacio de estados, a saber, si dividimos una ecuación por la otra para obtener

$$\frac{\mathrm{d}F_1}{\mathrm{d}F_2} = \frac{G_1}{G_2},$$

la cual representa los procesos posibles en el espacio de estados. El sistema es estable sii, a medida que F_1 aumenta, $\mathrm{d}F_2/\mathrm{d}F_1$ se aproxima a un número determinado. Este número es la pendiente de una recta en el espacio de estados, a saber, la trayectoria de equilibrio. Si, en cambio, el sistema diverge de la línea de equilibrio (imaginaria), es inestable. Véase la Figura B1. (La trayectoria de equilibrio puede ser un segmento finito o sólo un punto).

1.2. Cinemática analítica

En la subsección anterior nos ocupamos de la cinemática global de un sistema arbitrario. A diferencia de aquélla, la cinemática analítica presta atención a los componentes del sistema y a los vínculos que hay entre ellos. Supongamos, en beneficio de la simplicidad, que un sistema posee dos componentes, cada uno caracterizado por una propiedad. Llamemos F_1 y F_2 a las funciones que representan las propiedades peculiares del componente 1 y del componente 2 respectivamente. Supongamos que estas funciones varían de forma continuamente diferenciable con el tiempo y que la ley de evolución es

$$\dot{\mathbb{F}} = \mathbb{G}(\mathbb{F}), \qquad \text{con } \mathbb{F} = \langle F_1, F_2 \rangle,\ \mathbb{G} = \langle G_1, G_2 \rangle.$$

Supongamos, además, que el sistema es lineal, o sea, que

$$\dot{\mathbb{F}} = A \cdot \mathbb{F}, \qquad \text{con} \quad A = \left\| \begin{matrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{matrix} \right\|, \qquad \text{donde } a_{ii} \in \mathbb{R}.$$

Si los coeficientes no diagonales son nulos o muy pequeños comparados con los elementos diagonales, cada componente evoluciona por separado o casi por separado y, en lugar de un sistema propiamente dicho, tenemos sólo un agregado. De lo contrario, las evoluciones de los componentes del sistema están acopladas.

Ejemplo Sea $F_i(t)$ que representa la cantidad de material, de cierta clase, del i-ésimo componente del sistema, en el instante t. (Ese material puede ser materia, información, bienes, capital o lo que fuere). El sistema estará en un estado estable, y se mantendrá en él, siempre que cada componente devuelva tanto material como el que recibe, vale decir, sii $a_{12} = a_{21}$. Toda desviación de este estado de equilibrio suscitará una distribución desigual del material que mide F_i, vale decir, habrá viento, una fuga, desequilibrio de pagos, flujo migratorio o algún otro proceso de difusión o transporte. Si esta tendencia continúa sin regulación –es decir, si el sistema carece de mecanismos de control– puede que todo el material acabe concentrándose en uno de los componentes. En este punto de máxima heterogeneidad puede finalizar el intercambio y el sistema mismo puede llegar a su fin como sistema: cada componente comienza

a evolucionar de forma independiente respecto del otro. En síntesis, según sean los mecanismos de control, toda disparidad que haya habido o bien se nivelará (como en el caso de la transferencia de calor), o bien se incrementará en gran medida (como en el caso de la transferencia de capitales sin regulación). En pocas palabras, si se requiere un equilibrio, son necesarios controles.

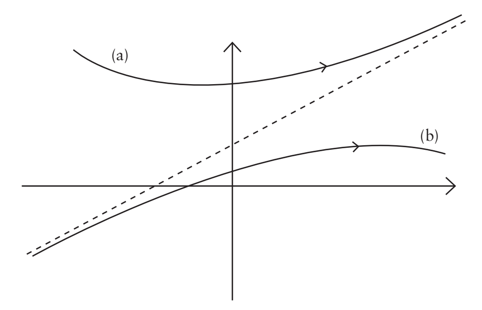


Figura B1. (*a*) Sistema estable. (*b*) Sistema inestable.

1.3. Las ecuaciones de equilibrio

En este Apéndice, de momento, no hemos distinguido ninguna variable de estado que represente los intercambios entre el sistema y su entorno. A continuación, pondremos remedio a esta carencia. Con este fin, presentaremos el concepto de espacio físico (corriente).

Ejemplo En $\dot{\mathbb{F}} = \mathbb{G}(x, t)$, establezcamos que $\mathbb{G} = - \nabla \cdot j$, donde j es una función vectorial de posición y tiempo que representa el flujo de cierta cosa. Este esquema legal se presenta con tanta frecuencia y de formas tan diversas que se le llama ecuación *de equilibrio* (*de conservación* o *de continuidad*) general y en ocasiones se la considera un enunciado puramente matemático, sin contenido fáctico alguno. Examinemos este asunto.

Sea σ un sistema con volumen V y superficie S, en un espacio tridimensional euclídeo. (Suponemos que σ no es un megasistema, por lo cual no requiere de la geometría de Riemann). Llamemos ρ a una propiedad intensiva (no extensiva) de ε y supongamos que σ interacciona con su entorno. Por definición, la propiedad extensiva ε asociada a ρ es

$$\varepsilon(\rho, t) = \int_V dV \, \rho(\sigma, x, t).$$

En beneficio de la determinación, pensemos que ρ es una densidad de masa y ε la masa total del sistema.

A continuación supondremos la siguiente hipótesis fáctica:

POSTULADO B1 Para toda propiedad extensiva ε de un sistema en interacción con su entorno, ε puede cambiar con el transcurso del tiempo de dos maneras (mutuamente compatibles): de manera espontánea (internamente) o como consecuencia de las interacciones entre ε y su entorno. Más precisamente, la tasa de cambio de ε se compone de dos partes: una fuente s y un flujo j, o

$$\dot{\varepsilon} = \int_V dVs + \int_s dS\, j_n,$$

donde j_n es la proyección de j sobre la normal interior a S. Véase la Figura B2.

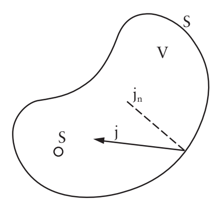


Figura B2. Intercambios de un sistema con su entorno según lo refleja la tasa de cambio de la propiedad intensiva ε del primero. Esta tasa consiste en la contribución (positiva o negativa) de la fuente (o sumidero s) a la contribución (positiva o negativa) del flujo j.

Mediante la aplicación del teorema de Green, un resultado puramente matemático, deducimos el

TEOREMA B1 Si ρ es la propiedad intensiva asociada a la propiedad extensiva que aparece en el Postulado B1, luego,

$$\dot{\rho} + \nabla \cdot j = s.$$

Ésta es la ecuación de equilibrio local (en lugar de integral o global). No se trata de un enunciado legal especial, sino de un *esquema de ley*: es válido para toda propiedad intensiva de un sistema arbitrario, ergo,

aparecerá siempre que se traten propiedades intensivas, sea en la mecánica cuántica, sea en los modelos continuos de flujo de tráfico. (La única limitación que tiene es que es local, o sea, que es válido únicamente en el vecindario de un marco de referencia).

Ejemplo Sea $j = -a(\delta\rho / \delta x) - b\rho$, donde a y b son números reales y $s = 0$. Luego,

$$\dot{\rho} = a\delta^2\rho / \delta x^2 + b\delta\rho / \delta x$$

representa la superposición de un proceso de difusión, que puede ser aleatorio, y una deriva causada por la fuerza $b\delta\rho / \delta x$. Pero incluso éste es sólo un esquema de ley, a menos que ρ se interprete en términos fácticos.

El Teorema B1 nos permite ofrecer una definición cuantitativa de la noción de cierre de un sistema:

DEFINICIÓN B1 Sea un sistema σ que interacciona con su entorno y posee n propiedades intensivas ρ_i con los flujos correspondientes j_i, donde $1 \leq i \leq n$. Luego, σ está *aislado* de (es *cerrado* con respecto a) su entorno durante un intervalo temporal dado

(i) *en el i-ésimo aspecto* sii el flujo j_i es nulo en el contorno del sistema para todo instante perteneciente al intervalo dado;

(ii) *en todos los aspectos* sii todos los flujos j_i son nulos en el contorno del sistema para todo instante perteneciente al intervalo dado.

COROLARIO B1 Para todo sistema aislado (cerrado) en el i-ésimo aspecto, $\dot{\rho}_i = s$.

Moraleja: antes de culpar al entorno por los cambios del sistema, búsquense las fuentes internas de cambio del sistema. Esto no sólo es válido en las ciencias naturales, sino también en las sociales.

1.4. El marco lagrangiano

Considérese un sistema de una clase cualquiera, con n componentes, cada uno de los cuales está caracterizado por tres funciones de estado básicas (llamadas coordenadas generalizadas), cuyos valores dependen únicamente de una variable de fase interpretable como coordenada

temporal de cierto marco de referencia. Un modelo lagrangiano de un sistema como ése se reduce a cierta función L de las coordenadas generalizadas $3n$, sus tasas e instante, que satisface cierta condición de extremalidad. A causa de que la naturaleza de los componentes se deja sin especificar, el modelo se ajusta a todo sistema que posea un número finito de partes, sean éstas físicas, biológicas o sociales. Esta generalidad referencial explica el amplio uso de la cinemática lagrangiana en diversos campos científicos y tecnológicos.

Una posible formalización de la noción de modelo lagrangiano es la que ofrece la

DEFINICIÓN B2 Sea σ un sistema compuesto por n partes y que, además, tiene una composición constante, es decir, tal que $\mathscr{C}_t(\sigma)$ = para todo $t, t' \in T$. Luego, la estructura $\mathscr{L} = \langle T, Q, L \rangle$ es un *modelo lagrangiano* de σ sii

(i) T es un subconjunto de la recta real ordenada por la relación $\leq$ de prioridad temporal o simultaneidad, y todo $t \in T$ representa un instante;

(ii) $Q = \{q_i \mid q_i: T \rightarrow \mathbb{R} \;\&\; 1 \leq i \leq 3n\}$ es un conjunto de funciones diferenciables una vez, de variable real y dependiente del tiempo [las funciones de estado básicas del sistema];

(iii) la 6n-tupla $\langle q_1 (\sigma, t), \ldots, q_{3n} (\sigma, t), \dot{q} (\sigma, t), \ldots, \dot{q}_{3n} (\sigma, t) \rangle$ representa al estado de σ en el instante t.

(iv) L es una función de variable real de las variables de estado, sus tasas y t –vale decir, $\langle q_i (t), \dot{q}_i (t), t \rangle \mapsto L (q_i, \dot{q}_i, t)$– tal que para todo $t \in [t_1, t_2] \subset T$ y puntos finales $q_i (t_1)$ y $q (t_2)$, luego, la integral

$$I =_{df} \int_{t_1}^{t_2} \mathrm{d}t \, L (\sigma, q_i, \dot{q}_i, t)$$

es o bien mínima, o bien máxima.

Al realizar las variaciones de primer orden indicadas (es decir, al calcular δI y hacerlo igual a 0) puede verse con facilidad que la definición axiomática anterior implica el siguiente sistema de ecuaciones $3n$:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \; \frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} - \frac{\delta L}{\delta q_i} = 0, \qquad 1 \leq i \leq 3n.$$

Si hay restricciones, es decir, si las coordenadas generalizadas q no son mutuamente independientes, las ecuaciones de «movimiento» son más generales: el miembro derecho es igual a una función Q_i que representa el efecto neto de las restricciones.

Hay veces en que es posible asignarles a estas ecuaciones cinemáticas una interpretación dinámica, a saber: que representan un equilibrio de fuerzas. En particular, $\delta L / \delta q_i$ representa la intensidad de la acción combinada del entorno y del resto del sistema sobre el componente caracterizado por los tres valores del índice *i*, y Q_i las fuerzas que equivalen a las restricciones. Estas últimas son de especial importancia en el caso de los sistemas sociales, donde no se puede decir que ninguna variable sea independiente de las demás.

Adviértase que, hasta aquí, no hemos especificado la función lagrangiana *L*. La adecuada elección de *L*, así como de los supuestos semánticos referentes a las coordenadas generalizadas q_i, dará como resultado las leyes de la mecánica de partículas. Una interpretación alternativa da como resultado la teoría de redes eléctricas. Otra interpretación redunda en cierta teoría de dinámica de poblaciones y así sucesivamente. En resumidas cuentas, el formalismo lagrangiano es independiente del tema. Por esta razón, no sólo pertenece a la ciencia y la tecnología, sino también a la ontología (Bunge, 1974c).

En numerosos campos de investigación, las ecuaciones de evolución tienen la siguiente forma

$$\dot{\mathbb{F}} = \mathbb{G}(\mathbb{F}, t)$$

(Sección 1.1). Estas ecuaciones son sólo un caso particular del formalismo lagrangiano con restricciones. En realidad, si se considera que los componentes F_i de la función de estado $\mathbb{F}$ son las coordenadas generalizadas y se introducen las definiciones

$$L =_{df} \sum_{k=1}^{n} F_k \dot{F}^k - \sum_{k=1}^{n} G_k F^k$$

$$Q_i =_{df} \mathbb{F} \cdot \frac{\delta \mathbb{G}}{\delta F_i} \,,$$

los dos conjuntos de ecuaciones coinciden. (Además, puesto que $\delta L / \delta \dot{F}_i = F_i$, se observa que las cantidades de movimiento generalizadas $p_i = \delta L / \delta \dot{F} i$ coinciden con las respectivas coordenadas generalizadas. Esto no trae ningún perjuicio, ya que, en general, las coordenadas ge-

neralizadas no son interpretables como coordenadas de posición. Así pues, en el caso de una sociedad, F_1 puede representar la población, F_2 el consumo de energía per cápita, F_3 el PIB per cápita, etc.). Hasta aquí llegamos con los modelos lagrangianos para sistemas discretos.

En el caso de un sistema continuo, tal como un cuerpo elástico, un campo eléctrico o una población de organismos lo bastante densa, se comienza a partir de una densidad lagrangiana y se obtiene L como el volumen integral de esa densidad. Como en el caso concreto, basta imponer unas cuantas condiciones, bastante moderadas, al modelo lagrangiano para producir un esquema de teoría de amplia cobertura, tan amplia, por cierto, que cuando se la enriquece con las condiciones o hipótesis subsidiarias adecuadas da como resultado cada una de las teorías de campos clásicas (Edelen, 1962). Estas condiciones especifican, pues, un modelo lagrangiano específico.

Lo que habitualmente llamamos *teoría axiomática de campos*, se propone desempeñar una función similar en relación con las teorías cuánticas de campos, especialmente con la electrodinámica cuántica. Sin embargo, a diferencia de la teoría clásica de campos mencionada previamente, su correlato cuántico no produce, como caso especial, la electrodinámica cuántica. «A lo sumo, puede proporcionar un marco para una teoría concreta de partículas existentes y sus correspondientes campos» (Jost, 1965, pág. xi). Además, se espera que este enfoque consiga evitar las inconsistencias que plagan las teorías cuánticas de campos. Todavía debe investigarse su papel en la metafísica.

Concluimos esta subsección con un comentario histórico. El marco lagrangiano fue prefigurado por Maupertuis como una síntesis de la dinámica y la metafísica. Lagrange, quien lo liberó de la metafísica, lo hizo dar frutos y Maxwell lo generalizó más allá de la dinámica. El axioma que contiene la Definición B2 (iv) es uno de los principios de la ciencia más sólidos y, a la vez, menos comprendidos. Maupertuis consideraba que la integral (de acción) I siempre era un mínimo e interpretó esto como un claro signo de la sabiduría divina: la naturaleza siempre escoge los caminos que minimizan I. Más tarde se descubrió que en algunos casos (notablemente en la óptica) I no es un mínimo, sino un máximo, por lo cual el principio fue rebautizado como principio de acción extremal, en lugar de principio de acción mínima. Sin embargo, diversos físicos, entre ellos Planck y Margenau, continuaron considerando que el principio de Maupertuis era una señal de finalidad y diseño. Se trata de un error,

aunque sólo fuese porque el principio, junto con ciertos lemas tomados del cálculo de variaciones, implica las ecuaciones de movimiento, en las cuales jamás se han detectado rastros de finalidad o diseño. Lo que sucede no es que el sistema se comporte de suerte tal de minimizar o maximizar su acción: el que todos los sistemas se comporten de esa manera es solamente una ley, una especialmente ubicua. A causa de esta generalidad, se debe admitir que el marco lagrangiano pertenece a la intersección entre la ciencia y la metafísica.

1.5. La analogía cinemática

Damos término a esta sección con algunos comentarios sobre la noción de analogía cinemática. Se puede decir que todos los sistemas que, independientemente de su composición y estructura precisas poseen la misma cinemática –y, por ello, pueden describirse correctamente mediante las mismas ecuaciones de evolución– son *cinemáticamente análogos* (o *equivalentes*). Por ejemplo, algunas oscilaciones periódicas, sean mecánicas, eléctricas, químicas, biológicas o económicas, satisfacen las mismas ecuaciones diferenciales, por lo cual son análogos cinemáticos. Así pues, las oscilaciones de relajación en un amplificador a válvula termoiónica se describen mediante la ecuación $\ddot{x} - a(1 - x^2)\dot{x} + bx = 0$, de la cual se dice que también describe el ruido que hace un trozo de tiza contra una pizarra, el flamear de una bandera al viento, el temblor causado por el frío y la recurrencia periódica de las epidemias.

No cabe duda de que el descubrimiento de las analogías cinemáticas desempeña un papel heurístico y ahorra tiempo. Pero no tienen importancia ontológica, salvo en la medida en que prueban que diferentes mecanismos pueden dar como resultado pautas de comportamiento globales semejantes, motivo por el cual el estudio del comportamiento no agota el estudio de la realidad. Por ejemplo, las partículas brownianas, las moscas domésticas y los borrachos se mueven de forma aleatoria, pero los mecanismos subyacentes son muy diferentes entre sí, de suerte tal que la observación de que se trata de análogos cinemáticos no posee la más mínima importancia metafísica. Lo que sí tiene interés es el descubrimiento de las analogías dinámicas entre sistemas de clases diferentes, vale decir, el descubrimiento de que ciertos *mecanismos*, tales como el transporte, la difusión, la fusión, la cooperación, la competencia, la

barajadura aleatoria y la mutación espontánea son notables en todos los niveles. Por tanto, dirijamos nuestra atención a los mecanismos.

2. Modelos dinámicos

2.1. Generalidades

Un modelo dinámico de un sistema es un modelo cinemático (Sección 1), en el cual puede interpretarse que algunas de sus variables «conducen» a otras. En otras palabras, un modelo dinámico incluye un *mecanismo* de cambio, vale decir, un subsistema o un proceso a través del cual los cambios de algunas propiedades del sistema provocan cambios en otras propiedades del mismo sistema. Además, todos los cambios son espaciotemporales o reducibles a cambios en el tiempo (tal el caso de las tasas) o en el espacio (como en los gradientes).

Ejemplo 1 La distribución geográfica de una bioespecie se puede explicar como el producto de la acción de tres mecanismos diferentes: la difusión aleatoria, la deriva y la resistencia ambiental (o presión selectiva). Un modelo dinámico del patrón espacial de una especie (o, mejor dicho, de una familia de poblaciones de una especie dada) es el que sigue. La tasa de cambio de la densidad poblacional ρ de la colección dada de poblaciones, en un punto x de la superficie del planeta, es

$$\frac{\delta\rho}{\delta t} = \underbrace{\alpha\, \delta^2\rho / \delta x^2}_{\text{Difusión}} - \underbrace{2\beta\delta\rho / \delta x}_{\text{Deriva}} + \underbrace{\gamma\rho(\rho - 1)}_{\text{Presión ambiental}}.$$

Ejemplo 2 Gran parte de lo anterior mantiene su validez si en lugar de interpretar γ como la densidad poblacional real se la interpreta como una probabilidad de densidad, de modo tal que $\rho\, dS$ represente la probabilidad de que $\rho\, dS$ individuos vivan en un área dS. En este caso, las tres fuerzas son estocásticas, como los empujes de las moléculas sobre una partícula browniana. *Ejemplo 3* Los modelos de campos son una clase de modelos dinámicos. Un campo es una cosa extendida de forma continua por una extensión de espacio. (Piénsese en el campo gravitatorio o en el campo magnético de nuestro planeta). En principio, un campo no puede considerarse un sistema, al igual que las partículas no pueden

considerarse sistemas, dado que ninguno de ellos tiene partes atómicas. Con todo, una colección de campos superpuestos en una región dada del espacio sí entra en la categoría de sistema. Una onda electromagnética ilustra un caso de sistema de campo puro. Además, un campo puede desempeñar cierto papel en un sistema cuya composición no se limita a los campos: su papel es el del cemento que mantiene unidos los restantes componentes. Podemos llamar *modelo de campos* de un sistema a todo modelo en el cual aparezca de manera esencial el concepto de campo, tal como ocurre en el caso del modelo (teórico) de una molécula. Los «campos» inventados por algunos biólogos, psicólogos y científicos sociales son falsos, ya que sólo se trata de metáforas.

Un modelo de campos es mecanísmico, no fenomenológico, pero su mecanismo no es mecánico. (Los mecanismos mecánicos son un subconjunto propio de los mecanismos).

2.2. Formalidades

Repetimos ahora, de manera ligeramente más precisa, la definición de mecanismo que ofrecimos al inicio de la subsección anterior:

DEFINICIÓN B3 Sea σ un sistema. Luego, un *mecanismo* de σ es o bien

(i) un componente m de σ tal que m actúa en σ, o bien

(ii) un proceso m de σ tal que otros procesos de σ dependen de m.

A continuación, propondremos el

POSTULADO B2 Todo sistema posee algún mecanismo.

Obviamente, este postulado (*a*) sobrepasa la experiencia, (*b*) se opone al fenomenismo y al descriptivismo (por ejemplo, al conductismo) y (*c*) promueve el desarrollo de teorías. La clase de teorización que nuestro postulado fomenta es, desde luego, la que consiste en la construcción de modelos dinámicos. Se puede definir un *modelo dinámico* de un sistema como un modelo que representa uno o más mecanismos del sistema.

Una formulación corriente de un modelo dinámico es la que se hace en el marco general de la dinámica hamiltoniana. Así como todo modelo cinemático puede ser formulado en términos lagrangianos (Sección 1.4), casi todo modelo dinámico puede formularse de forma hamiltoniana. Se recordará que los primeros tienen un conjunto de $3n$ funciones básicas,

a saber, las coordenadas generalizadas q_i. Los modelos hamiltonianos, en cambio, se basan en dos funciones de estado básicas: las mismísimas coordenadas generalizadas q_i y los respectivos momentos generalizados p_i que son lógicamente independientes de las primeras. Así como las soluciones q_i de un problema lagrangiano pueden representar la configuración espacial del sistema, las respectivas p_i representan la dinámica del sistema. En particular, las tasas $\dot{p}_i$ pueden representar las fuerzas que actúan sobre las diferentes partes del sistema. Si se conoce la L lagrangiana del sistema, las p_i están dadas por $p_i = \delta L\ \delta\dot{q}_i$ y el hamiltoniano del sistema por $H = \Sigma p_i \dot{q}_i - L$. Pero si se desconoce L, entonces el problema debe formularse de nuevo mediante la apropiada elección de las variables básicas y conjeturando el hamiltoniano adecuado. Las ecuaciones básicas de movimiento son

$$\dot{p}i = \delta H / \delta q_i, \qquad \dot{q}i = \delta H / \delta p_i.$$

Por consiguiente, la solución a un problema hamiltoniano está resumida en la función de estado $\mathbb{F} = \langle q_1, q_2, \ldots, q_{3n}, p_1, p_2, \ldots, p_{3n} \rangle$. Cada valor de esta función representa un estado posible del sistema. Y a medida que pasa el tiempo, la punta de $\mathbb{F}$ describe una trayectoria en el espacio de estados del sistema, que en este caso se llama *espacio de fases*.

Aunque la teoría general hamiltoniana –a saber, aquella en la que H se deja sin especificar y las variables de estado básicas sin interpretar– pertenece a la ontología científica, no la estudiaremos en detalle. (Para ello y para otras teorías dinámicas, véase Bunge, 1976b, Capítulo 2). Nuestros propósitos al mencionar aquí la teoría son (*a*) hacer hincapié en la riqueza de la ontología que se origina en la ciencia y (*b*) dilucidar el concepto de analogía dinámica. Este último puede definirse del siguiente modo. Sean σ y σ' dos sistemas modelizados por los hamiltonianos $H_\sigma(q, p, t)$ y $H_{\sigma'}(q', p', t')$ respectivamente. Luego, se dice que σ y σ' son análogos *dinámicos* sii H_σ y $H_{\sigma'}$ son formalmente iguales según una transformación de semejanza de sus variables dependientes, vale decir, si $q' = aq$, $p' = bp$ y $t' = ct$, donde a, b y c son números complejos. No hay ninguna condición respecto de la interpretación de estas variables.

A continuación, pasemos a discutir los procesos dinámicos de dos clases muy difundidas, a saber, la competencia y la cooperación, que trataremos de forma conjunta en un único modelo dinámico.

2.3. La ubicuidad de la cooperación y la competencia

Cuando dos o más cosas se unen para formar un sistema, se puede decir que cooperan entre sí, aun cuando no lo hagan de forma deliberada. Por ejemplo, se puede considerar cada una de las síntesis (físicas, químicas, biológicas o sociales) $A + B \rightharpoonup C$ y $A + D \rightharpoonup E$ como un proceso cooperativo: los A cooperan con los B para formar los C y lo mismo ocurre en la segunda reacción. Sin embargo, si los dos procesos acontecen simultáneamente en el mismo lugar, los dos procesos cooperativos compiten entre sí: en efecto, ahora los B y los D compiten por los A. Así pues, en este caso hay tanto cooperación (en ciertos aspectos) como competencia (en otros). Asimismo, dos familias (u otros sociosistemas) pueden competir entre ellos a la vez que sus respectivos miembros cooperan entre sí.

Una definición posible de las nociones en cuestión es la que sigue:

DEFINICIÓN B4 Sean x, y y z cosas. Luego,

(i) x *coopera* con y sii existe un sistema z, tal que x e y pertenezcan a la composición de z;

(ii) x *compite* con y por z sii la formación de un sistema compuesto por x y z interfiere en la de un sistema compuesto por y y z.

Adviértase que, de acuerdo con esta definición, la competencia no es lo opuesto de la cooperación. Más aún, dos cosas pueden cooperar en ciertos aspectos y competir en otros.

Se ha prestado mucha menos atención a la cooperación que a la competencia. En particular, desde Heráclito, la mayoría de los filósofos ha hecho hincapié en la guerra en desmedro de la cooperación ignorando que la competencia entre sistemas exige la cooperación dentro del sistema. En cambio, los biólogos, los farmacólogos y los médicos tienen tendencia a hacer hincapié en que los componentes de la célula normal actúan cooperando, que todo organismo saludable es sinérgico y que sólo la enfermedad y la senilidad rompen los vínculos cooperativos.

En tiempos recientes, los físicos se han unido a los biólogos en el estudio de diversos procesos cooperativos. Un asombroso descubrimiento, congruente con esta perspectiva, ha marcado el nacimiento de toda una nueva rama de la ciencia, a saber, la física del plasma. Las formas colectivas o molares de oscilación y propagación se descubrieron en sistemas tan modestos como los cuerpos constituidos por gases a temperatura muy elevada y altamente ionizados, los cuales, según las ideas clásicas, debe-

rían ser el paradigma del caos y la homogeneidad. Las ondas de plasma, tanto las estacionarias como las que viajan, así como la emergencia de las complejas formas de los cuerpos de plasma (plasmones), han refutado la creencia de que todo lo que una molécula puede hacer en un gas es moverse de forma caprichosa y chocar aleatoriamente con otras moléculas, sin jamás dar lugar a un nuevo sistema caracterizado por nuevas formas de comportamiento global. Aproximadamente al mismo tiempo, los químicos descubrieron el enlace de hidrógeno, que puede dar lugar a maravillas de la cooperación, tales como las biomoléculas. En pocas palabras, actualmente, la cooperación está tan de moda como lo estuvo la competencia hace un siglo. Lo que ya está bien, puesto que a menos que se admita la cooperación, además de la competencia, no es posible dar cuenta de la existencia misma de los sistemas. En primer lugar, la ubicuidad de los procesos de ensambladura no se hubiera admitido si los científicos hubiesen adoptado la ontología de la lucha heraclitana.

Nos arriesgaremos y propondremos el

POSTULADO B3 La cooperación es aproximadamente tan frecuente como la competencia.

A continuación, pondremos remedio a la vaguedad de esta formulación mediante el repaso de un modelo matemático de procesos en el cual la cooperación se entrelaza con la competencia (Bunge, 1976).

2.4. La dinámica de los procesos competitivo-cooperativos

Supongamos que dos cosas o dos sistemas, *a* y *b*, consumen o producen una tercera cosa *c*. No haremos ninguna suposición acerca de la naturaleza de estas cosas ni, mucho menos, sobre los mecanismos de consumo o de producción. Pero sí supondremos algo acerca de los modos de cooperación y competencia entre *a* y *b* con respecto a *c*. De hecho, supondremos que cada componente, cuando está solo, consume o produce *c* a un ritmo constante (posiblemente cero) y que cada uno de ellos puede subsistir o no. También supondremos que los componentes alcanzarán de seguro el nivel óptimo (de consumo o de producción) si cooperan entre sí. Por último, supondremos que esta cooperación se hace más intensa cuanto más se necesita, que se detiene cuando ya no es necesaria y que a partir de ese momento se transforma en un obstáculo,

de suerte tal que el crecimiento se mantiene bajo control. Este proceso puede formalizarse del siguiente modo.

Sean $A(t)$ y $B(t)$ las cantidades instantáneas de la cosa c consumida o producida por los componentes a y b respectivamente, y llámese α y β a los niveles óptimos o de saciedad. Además, sean

$$A(0) = c_1 < \alpha, \qquad B(0) = c_2 < \beta$$

los valores iniciales. En ausencia de interacciones, se supone que los ritmos son constantes (posiblemente cero):

$$\dot{A} = a_{11}, \qquad \dot{B} = a_{22} \qquad \text{con} \qquad a_{11}, a_{22} \in \mathbb{R}+.$$

Si las tasas son nulas, no tiene lugar ningún proceso. Si son positivas, cada individuo alcanza finalmente y supera su nivel óptimo. Más aún, si se establece una cooperación desde el comienzo, a ayudará a b en proporción a las necesidades de éste, vale decir, de forma tal que se compense el desequilibrio $\beta - B$; y b contribuirá, a su vez, en proporción al desequilibrio $\alpha - A$, si bien no necesariamente con la misma intensidad. Esta ayuda mutua, según hemos supuesto, es positiva en la medida en que haya un déficit (un balance negativo); se torna nula al alcanzar la saciedad y negativa en cuanto hay un superávit (un balance positivo). Las fórmulas más simples que representan este proceso cooperativo son las ecuaciones no lineales

$$\dot{A} = a_{11} + a_{12}\,(\alpha - A)B, \qquad \dot{B} = a_{22} + a_{21}\,(\beta - B)A$$

en las cuales $ai_j \geq 0$ para $i, j = 1, 2$.

El coeficiente a_{12} mide la intensidad de la ayuda que a obtiene de b, mientras que a_{21} hace lo propio con la ayuda que a presta a b. En el punto óptimo $\langle \alpha, \beta \rangle$ no hay ni ayuda ni obstaculización: cada componente se vale por sí mismo, con lo cual el sistema se descompone temporalmente.

Ahorraremos al lector el tratamiento del caso general en el vecindario del punto óptimo mostrando que, en efecto, en cuanto a alcanza el nivel α su compañero b se vuelve contra aquél obligándolo a disminuir su tasa de consumo o de producción. (Cf. Bunge, 1976). En lugar de ello, estudiaremos el caso particular en el que los dos compañeros se

comportan exactamente del mismo modo. En este caso, vale decir, para $c_1 = c_2 = c$ (sin ventaja inicial), $a_{11} = a_{22}$ (tasas individuales iguales), $a_{12} = a_{21}$ (ayuda simétrica), y $\alpha = \beta$ (requisitos iguales), nos queda una única ecuación de evolución, a saber,

$$\dot{X} = a_{11} + a_{12}\,(\alpha - X)X, \qquad X = A, B.$$

Encontramos que la solución general a esta ecuación es

$$X\,(t) = a_{11}t + \frac{\alpha c}{c + (\alpha - c)\exp\,(-\ a_{12}\ \ \alpha t)}.$$

Si cada compañero es autosuficiente ($a_{11} = a_{22} > 0$), la cooperación sólo acelera el proceso hasta el punto óptimo y lo obstaculiza a partir de ese punto. De lo contrario (es decir, si $a_{11} = a_{22} = 0$), la ayuda mutua hace posible el proceso. En efecto, el segundo término de la última ecuación representa el crecimiento de A (que es igual a B) desde el valor inicial c hacia la asíntota $A\,(\infty) = \alpha > c$. La rivalidad, a partir de este punto, impide el crecimiento ilimitado, sea del consumo, sea de la producción. Véase la Figura B3. Esta restricción tiene lugar haya o no una limitación externa, tal como la escasez de recursos: el control es estrictamente interno. Esto no quiere decir que no haya restricciones externas, sino sólo que nuestro modelo no las tiene en cuenta.

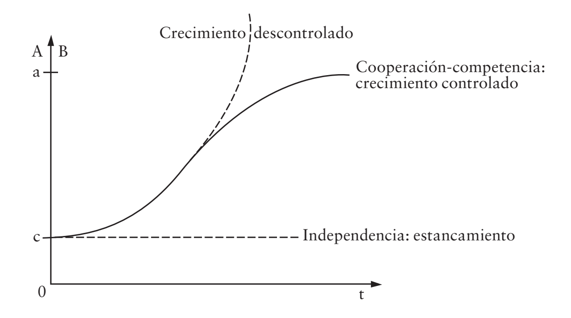


Figura B3. Línea continua: un sistema compuesto por compañeros que cooperan y compiten ($a_{12} \neq 0$) pero que aislados (vale decir, cuando $a_{11} = a_{22} = 0$) son impotentes. Línea discontinua: estancamiento en ausencia de interacción (vale decir, $a_{12} = 0$).

Los modelos dinámicos generales de esta clase poseen por lo menos tres usos posibles: (*a*) pueden sugerir la búsqueda de sistemas reales (por ejemplo, en la morfogénesis, la neurología, la ecología o la sociología) que se acerquen al estado de crecimiento cero de alguna de sus variables como resultado de su estructura cooperativa-competitiva; (*b*) pueden estimular el desarrollo de teorías específicas que comprendan sistemas reales cuyo comportamiento sea como el bosquejado por el modelo; (*c*) pueden ayudar a planificar los controles sociales. En particular, nuestro modelo sugiere el rediseño de la sociedad de forma tal que cada miembro ayude a su vecino en forma proporcional a su propia capacidad y a las necesidades de aquél, y que controle el crecimiento de su compañero y, a la vez, sea controlado por éste, con lo cual se evita tanto la escasez como el derroche y se combinan las características positivas de la competencia con las de la cooperación.

3. Modelos de cambio cualitativo

3.1. Cinemáticos: operadores de nacimiento y de muerte

Todas las ciencias tratan con cambios cualitativos y hasta con cambios cualitativos profundos, tales como los cambios de clase, o transmutaciones de las cosas de cierta clase en cosas de una clase diferente. Estos cambios de clase se pueden conceptuar de diversas maneras. La más simple de ellas es la que consiste en tratar cada clase como un nodo de un grafo y la transformación como la arista de un grafo dirigido. Éste es, por tanto, un grafo dirigido y conectado, por ejemplo, uno que representa un linaje, tal como un esquema de desintegración o un árbol filogenético. Si se desea una representación cuantitativa, aunque puramente fenomenológica, de estos cambios cualitativos, se debe idear una forma de decir cuántas cosas de cada clase emergen o desaparecen en un proceso dado, sin proponer ningún mecanismo de transmutación. Mostraremos un modelo así, inspirado en la teoría cuántica de campos.

Considérese un sistema compuesto por cosas de especies (clases naturales) diferentes $K_{m,}$ en el cual m es un número natural mayor que 2. Llámese n_m a la población instantánea de la clase K_m del sistema. El estado del sistema, tal que haya n_1 cosas de la clase K_1, n_2 de la clase K_2 y, en general, n_m de la clase K_m, puede representarse mediante una función de estado $u(n_1 n_2 \ldots n_i \ldots)$. Por consiguiente,

$u(0000...)$ representa el estado de no sistema,

$u(1000...)$ representa el estado tal que el sistema tiene un único componente de la clase K_1 y ninguno de las demás clases;

$u(0n0...)$ representa el estado del sistema cuando se compone de n unidades de la clase K_2.

Supondremos que la totalidad de esos valores de la función de estado abarca el espacio de estados S del sistema. Además, postularemos que S es un espacio vectorial, de suerte tal que toda combinación lineal de los u representa un estado posible del sistema. Los vectores unitarios $\varepsilon_1 = (100...)$, $\varepsilon_2 = (0100...)$, $\varepsilon_3 = (00100...)$ constituyen una base del espacio vectorial.

A continuación, presentaremos los *operadores de nacimiento* $B_i: S \rightarrow S$ definidos por

$$B_i u(n_1 \ldots n_i...) = (n_i + 1)^{1/2}\, u(n_1 \ldots n_i + 1...).$$

B_i representa el cambio de estado del sistema, producido por la adición, en la composición del sistema, de una cosa de la clase K_i.

De forma similar, definimos la desaparición, en la composición del sistema, de una unidad de la clase K_i:

$$D_i u(n_1 \ldots n_i \ldots) = (n_i)^{1/2}\, u(n_1 \ldots n_i - 1 \ldots),$$

y llamamos $D_i: S \rightarrow S$ al *operador de destrucción* de la clase K_i. Se puede probar (por ejemplo, Mandl, 1959) que los dos operadores son mutuamente adjuntos, vale decir, que $D_i = B_i^\dagger$, donde el obelisco designa la transposición y conjugación de las entradas de las representaciones matriciales de los operadores. De ello se deduce que $B_i D_i$ deja las cosas en el estado que se encontraban al inicio, es decir,

$$B_i D_i u(n_1 \ldots n_i...) = n_i u(n1 \ldots n_i \ldots).$$

Los autovalores de $B_i D_i = B_i B_i^\dagger$ son las poblaciones posibles de la clase K_i en el sistema. En consecuencia, $B_i D_i = N_i$ es un operador que puede interpretarse como el operador poblacional (o número de ocupación) para la clase K_i.

Los operadores de nacimiento básicos pueden combinarse para dar como resultado operadores que representen cambios arbitrarios de la

composición del sistema. Así pues, $(B_i^\dagger)^p B_j^{\,q}$ representa la destrucción de p individuos de la clase K_i y el nacimiento de q individuos de la clase K_j. En otras palabras,

$$(B_i^\dagger)^p B_j^{\,q} \text{ representa la reacción } pK_i \rightarrow qK_j,$$

mientras que $(B_i^\dagger)^p B_i^{\,q}$ representa la reacción inversa. En términos matemáticos, $B_i^\dagger)^p B_j^{\,q}$ transforma el vector $u(n_1 \ldots n_i \ldots n_j \ldots)$ en $(n_i\,!(n_i + q)!\,/\,p!n_j!)^{1/2}\, u(n_1 \ldots n_i - p \ldots n_j + q \ldots)$. Por último, las combinaciones de los operadores de nacimiento generan todo el espacio de estados a partir del estado de no sistema (o cero) $u(000\ldots)$. Por consiguiente, $B_i^{\,p} B_j^{\,q} u(000\ldots)$ es proporcional al vector de estado que representa la situación en la cual en el sistema hay p componentes de la clase K_i y q de la clase K_j, y nada más.

Debido a que no hemos hecho ninguna suposición, excepto que los cambios considerados son cambios discretos de clase, el anterior es un marco para una teoría cinemática (fenomenológica) antes que para una teoría propiamente dicha. Pero eso es lo que queremos en la ontología: un formalismo más específico correspondería a la ciencia.

3.2. Dinámicos: impactos aleatorios

Presentaremos el bosquejo de una teoría sumamente simple, tanto dinámica como estocástica, que sugiere una hipótesis ontológica muy general. La teoría trata del efecto mutagénico de ciertos agentes externos que impactan aleatoriamente un sistema. (Véase Maynard Smith, 1968). Supongamos que un sistema contiene m componentes *(objetivos)* sensibles a ciertos agentes transmutadores discretos (*proyectiles*). Los componentes sensibles deben ser una parte decisiva de la totalidad de la cosa, aun cuando constituyan una pequeña parte de ella: pueden ser núcleos atómicos o celulares, orgánulos, sociosistemas clave o lo que sea. Los agentes perturbadores pueden ser partículas ionizantes, radiaciones, terroristas, burócratas o cualquier otra cosa. Se supone que cada impacto o colisión de un proyectil con un objetivo produce una mutación en éste o lo destruye y que, en todo caso, da como resultado un cambio de clase. El problema consiste en calcular la probabilidad de que n proyectiles al azar produzcan un cambio de clase (o transmutación) en un sistema con m componentes sensibles.

Supongamos que cada proyectil puede actuar sobre un único objetivo, en lugar de matar varios pájaros de un tiro: es decir, limitemos nuestra atención a impactos únicos. Llamemos p a la probabilidad de que un proyectil arbitrario produzca una mutación en un objetivo y supongamos que se dispara un total de n proyectiles en el sistema, sin rumbo fijo ni coordinación predeterminada. Supongamos, además, que el efecto que produce cada proyectil exitoso no tiene consecuencias sobre otros objetivos del sistema, o sea, que los efectos son mutuamente independientes, por lo que sólo nos interesa su efecto acumulativo. Puesto que la probabilidad de que un proyectil no dé en el blanco es $q = 1 - p$, la probabilidad de que el objetivo no mute en una circunstancia que incluye n proyectiles aleatorios es

$$q^n = (1 - p)^n \cong e^{-pn} \qquad \text{para } n \text{ grandes.}$$

Además, la probabilidad de que todos los m componentes sensibles permanezcan sin modificación después de una tanda de n disparos será el producto de la anterior, vale decir,

$$Q \cong (e^{-pn})^m.$$

En consecuencia, la probabilidad de que la totalidad de los m componentes sensibles reciba un impacto y mute es

$$P = 1 - Q \cong 1 - e^{-pmn},$$

la cual se acerca a 1 a medida que aumenta el número de proyectiles. En consecuencia, el número promedio de mutaciones inducidas por los n proyectiles es Pm, el cual se aproxima a m a medida que n aumenta. En palabras: la probabilidad de que los proyectiles sean ineficaces disminuye de forma exponencial a medida que aumenta el número de proyectiles, a la vez que la probabilidad de que el sistema experimente una transmutación radical se incrementa de forma monótona con el número de proyectiles: véase la Figura B4.

Ahora bien, todo sistema está sometido a algún mutágeno, sean partículas cargadas rápidas, neutrones lentos, radiación intensa, depredadores, críticos, saboteadores o cualquier otra cosa. Además, ya sea que los misiles hayan sido apuntados y coordinados, ya sea que vayan al azar, es probable que tengan algunos efectos, no necesariamente

destructivos, pero sí, en todo caso, transmutadores. Por consiguiente, podemos hacer esta generalización amplia:

POSTULADO B4 Todo sistema, salvo el universo, está sometido a acciones aleatorias que, finalmente, producen su descomposición o su mutación (cambio de clase).

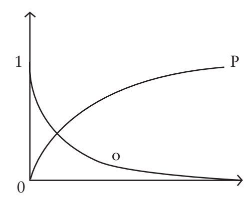


Figura B4. Efectos probables de los impactos aleatorios.

Adviértase que no estamos suponiendo que todos los agentes mutagénicos son externos al sistema de interés: basta con que sean externos a sus componentes sensibles. Por ejemplo, los cromosomas están sometidos no sólo a la radiación externa, sino también a las acciones térmicas y químicas del protoplasma del entorno. Y todo sistema cultural es beneficiario o víctima no sólo de las acciones económicas y políticas, sino también de sus propios miembros creativos y destructivos.

Bibliografía

Alston, William P. (1974). Conceptual prolegomena to a psychological theory of intentional action. En Brown, Comp., 1974, pág. 71-101.

Anderson, James A. (1972). A simple neural network generating an interactive memory. *Mathematical Biosciences* **14**: 197-220.

Anderson, James A. (1973). A theory for the recognition of items from short memorized lists. *Psychological Review* **80**: 417-438.

Arbib, Michael A. (1969). Automata theory. En Kalman y otros, 1969.

Apter, M. J. y Lewis Wolpert (1965). Cibernetics and development. *Journal of Theoretical Biology* **8**: 244-257.

Aris, Rutherford (1965) Prolegomena to the rational analysis of systems of chemical equations. *Archive for Rational Mechanics Analysis* **19**: 81-99.

Aristóteles (1941). *The Basic Works of Aristotle*. Richard McKeon, Comp., Nueva York, Random House.

Armstrong, David M. (1968). *A Materialist Theory of the Mind*. Londres, Routledge & Kegan Paul.

Ashby, W. Ross (1956). *An Introduction to Cibernetics*. Nueva York, Wiley.

Athans, M. y P. L. Falb (1966). *Optimal Control*. Nueva York, McGraw Hill.

Ayala, Francisco J. (1974). The concept of biological progress. En Ayala y Dobzhansky, Eds. 1974, págs. 339-355.

Ayala, Francisco J. y Theodosius Dobzhansky, Eds. (1974). *Studies in the Philosophy of Biology*. Los Angeles y Berkeley, University of California Press.

Bergson, Henri (1907). *L'évolution creatrice*, 77ª ed., París, Presses Universitaires de France.

Berlinski, David (1976). *On Systems Analysis*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
Bertalanffy, Ludwig von (1950). An outline of general system theory. *British Journal for the Philosophy of Science* **1**: 139-164.
Bertalanffy, Ludwig von (1968). *General System Theory*. Nueva York, Braziller.
Bindra, Dalbir (1976). *A Theory of Intelligent Behavior.* Nueva York, Wiley.
Birkhoff, Garret y Thomas C. Bartee (1970). *Modern Applied Algebra*. Nueva York, McGaw Hill Book Co.
Bogen, Joseph (1969). The other side of the brain: an appositional mind. *Bulletin of the Los Angeles Neurological Society* **34**, 3: 135-162.
Bonner, John Tyler (1974). *On Development. The Biology of Form*. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
Borst, C. V. Comp. (1970). *The Mind-Brain Identity Theory*. Nueva York, St. Martin's Press.
Boulding, Kenneth (1956). General systems theory – the skeleton of science. *Management Science* **2**: 197-208.
Bowler, Peter J. (1976). *Fossils and Progress*. Nueva York, Science History Publications.
Brandt, Richard y Jaegwon Kim (1967). The logic of identity theory. *Journal of Philosophy* **64**: 515-537.
Braudel, Fernand (1949). *La Méditerranée et le monde méditerranéen á l'epoque de Pilippe II*. París, Armand Colin.
Braudel, Fernand (1969). *Écrits sur l'histoire*. París, Flammarion.
Brown, S. C. Comp. (1974) *Philosophy and Psychology*. Londres, Macmillan.
Bunge, Mario (1959a). *Causality: The Place of the Causal Principle in Modern Science*. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press. [*La causalidad: el principio de causalidad en la ciencia moderna*. Traducción al castellano de Hernán Rodríguez. Buenos Aires, Sudamericana, 1997].
Bunge, Mario (1959b). *Metascientific Queries*. Springfield, Illinois, Charles C. Thomas.
Bunge, Mario (1960). Levels: a semantical preliminary. *Review of Metaphysics* **13**: 396-406, reimpreso, con ligeros cambios, como 1963b.
Bunge, Mario (1963a). A general black box theory. *Philosophy of Science* **30**: 346-358

Bunge, Mario (1963b). *The Myth of Simplicity*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey, Prentice-Hall.
Bunge, Mario (1964). Phenomenological theories. En M. Bunge, Comp., *The Critical Approach. Essays in Honor of Karl Popper*, págs. 234–254. Glencoe, Free Press. [Teorías fenomenológicas. Traducción al castellano de J. L. García Molina. En *Teoría y realidad*, págs. 53-86. Barcelona, Ariel, 1985].
Bunge, Mario (1967a). *Scientific Research*, 2 vols. Nueva York, Springer–Verlag. Ed. rev.: Nueva Brunswick, Transaction Publishers, 1998. [*La investigación científica*. Traducción al castellano de M. Sacristán. México, Siglo Veintiuno Editores, 2001].
Bunge, Mario (1967). *Foundations of Physics*. Nueva York, Springer–Verlag.
Bunge, Mario (1971). Is scientific metaphysics possible? *Journal of Philosophy* **68:** 507–520.
Bunge, Mario (1973a), *Method, Model and Matter.* Dordrecht y Boston, D. Reidel Publishing Co.
Bunge, Mario (1973b). *Philosophy of Physics*. Dordrecht, D. Reidel Publishing Co.
Bunge, Mario (1974a). *Sense and Reference*. Vol. 1 del *Treatise on Basic Philosophy.* Dordrecht y Boston, D. Reidel Publishing Co. [*Sentido y referencia*. Vol. 1 del *Tratado de filosofía*. Traducción al castellano de R. González del Solar. Barcelona, Gedisa, 2008].
Bunge, Mario (1974b). *Interpretation and Truth.* Vol. 2 del *Treatise on Basic Philosophy*. Dordrecht y Boston, D. Reidel Publishing Co. [*Interpretación y verdad*. Vol. 2 del *Tratado de filosofía*. Traducción al castellano de R. González del Solar. Barcelona, Gedisa, 2009].
Bunge, Mario (1974c). Les présupposés et les produits métaphysiques de la science et de la technique contemporanies. *Dialogue* **13:** 443-453.
Bunge, Mario (1974d). The concept of social structure. En W. Leinfellner y W. Kohler, Comps., *Developments in the Methodology of the Social Sciences*, págs. 175-215. Dordrecht y Boston, D. Reidel Publishing Co.
Bunge, Mario (1976). A model for processes combining competition with cooperation. *Applied Mathematical Modelling* **1**: 21-3.
Bunge, Mario (1977a). *The Furniture of the World*. Vol. 2 del *Treatise on Basic Philosophy.* Dordrecht y Boston, D. Reidel Publishing Co. [*El moblaje del mundo*. Vol. 3 del *Tratado de filosofía*. Traducción al castellano de R. González del Solar. Barcelona, Gedisa, *en prensa*].

Bunge, Mario (1977b). States and events. En W. E. Hartnett, Comp., *Systems: Approaches, Theories, Applications,* págs. 71-95. Dordrecht, D. Reidel Publishing Co.
Bunge, Mario (1977c). The GST challenge to the classical philosophies of science. *International Journal of General Systems* **4**: 29-37.
Bunge, Mario (1977d). General systems and holism. *General Systems* **22**: 87-90.
Bunge, Mario (1977e). Emergence and the mind. *Neuroscience* **2**: 501-509.
Bunge, Mario (1977f). Levels and reduction. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* **2**: 75-82.
Bunge, Mario (1977g). The philosophical richness of technology. En F. Suppe y P. D. Asquith, Comps., *PSA* **2**: 153-172.
Bunge, Mario (1977h). A systems concept of the international system. En Bunge y otros, Comps., págs. 291-305.
Bunge, Mario (1978a). A model of evolution. *Applied Mathematical Modeling* **2**: 201-204.
Bunge, Mario (1978b). A systems concept of society: Beyond individualism and holism. *Theory and Decision* **10**: 13-30.
Bunge, Mario y Máximo García-Sucre (1976). Differentiation, participation, and cohesion. *Quality and Quantity* **10**: 171-178.
Bunge, Mario, Johann Galtung y Mircea Malitzia, Comps. (1977). *Mathematical Approaches to International Relations*. Bucarest, Academia Rumana de Ciencias Políticas y Sociales.
Bunge, Mario y Rodolfo Llinás (1978). The mind-body problem in the light of neuroscience. *Proceedings of the 16th World Congress of Philosophy*.
Calvin, Melvin (1969). *Chemical Evolution*. Nueva York y Oxford, Oxford University Press.
Chiaraviglio, Lucio (1965). Sequential machines and the coding of polypeptides. *Journal of Theoretical Biology* **8**: 130-140.
Chomsky, Noam (1968). *Language and Mind*. Nueva York, Harcourt & World. [*El lenguaje y el entendimiento*. Traducción al castellano de J. Ferraté y S. Oliva: Barcelona, Seix Barral, 1977].
Cowan, Jack (1976). Are there modifiable synapses in the visual cortex? En Rosenzweig y Bennet, 1976, págs. 133-143.
Craik, Kenneth J. W. (1966). *The Nature of Psychology.* Stephen L. Sherwood, Ed. Cambridge, Cambridge University Press.

Crick, Francis (1970). Central dogma of molecular biology. *Nature* **227**: 561-563.

Delgado, José M. R. (1969). *Physical Control of the Mind*. Nueva York, Harper & Row.

Deutsch, Karl W. (1968). *The Analysis of International Relations*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey, Prentice-Hall.

Dobzhansky, Theodosius (1970). *Genetics of the Evolutionary Process*. Nueva York y Londres, Columbia University Press. [*Genética del proceso evolutivo*. Traducción de A. Alduvín. México, Extemporáneos, 1975].

Dorf, Richard C. (1974). *Modern Control Systems*, 2da ed. Reading, Massachusetts, Addison Wesley Publishing Co.

Du Bois-Reymond, Emil (1872). Ueber die Grenzen des Naturerkennens. En *Reden*, 2da ed. Leipzig, Veit und Co.

Dunbar, Max (1960). The evolution of stability in marine ecosystems: natural selection at the level of the ecosystem. *American Naturalist* **94**: 129-136.

Edelen, Dominic G. B. (1962). *The Structure of Field Space*. Berkeley, University of California Press.

Eigen, Manfred (1971). Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules. *Naturwissenschaften* **58**: 465-523.

Feigl, Herbert (1958). *The 'mental' and the 'physical'*. En H. Feigl, M. Scriven, G. Maxwell, Comps. Minnessota Studies in the Philosophy of Science II, págs. 370-497. Minneapolis, University of Minnesota Press.

Feinberg, Martin (1972). On chemical kinetics of a certain class. *Archives of Rational Mechanics Analysis* **46**: 1-41.

Florkin, M., Comp. (1960). *Aspects of the Origin of Life*. Oxford, Pergamon Press.

Fox, Sidney W. y K. Dose (1972). *Molecular Evolution and the Origin of Life*. San Francisco: Freeman & Co.

Freeman, Walter J. (1973). A model of the olfactory system. En M. A. M. Brazier, D. O. Walter y D. Schneider, Eds. *Neural Modelling*, págs. 41-62. Los Angeles, UCLA Brain Research Institute.

Fritsch, Bruno (1974). *Wachstum Bregrenzung als Machtinstrument*. Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt.

Frondizi, Risieri (1953). *The Nature of the Self. A Functional Interpretation*. New Haven, Connecticut, Yale University Press. Reimpreso: Carbondale, Illinois, Southern Illinois Press, 1971.

Gall, John (1977). *Sistemantics: How Systems Work and Especially How They Fail*. Nueva York, Quadrangle.

Gardner, R. A. y B. T. Gardner (1969). Teaching sign language to a chimpanzee. *Science* **165**: 664-672.

Gazzaniga, Michael S. (1967). The split brain in man. *Scientific American* **217**, 2: 24-29.

Gierer, H. y H. Meinhardt (1972). A theory of biological pattern formation. *Kybernetik* **12**: 30-39.

Ginsburg, S. (1962). *An Introduction to Mathematical Machine Theory*. Reading, Massachusetts, Addison-Wesley Publ. Co.

Ginzburg, A. (1968). *Algebraic Theory of Automata*. Nueva York, Academic Press.

Glansdorff, P. e I. Prigogine (1971). *Themodynamic Theory of Structure, Stability, and Fluctuations*. Londres, Wiley-Interscience.

Glass, Leon (1973). Stochastic generation of regular distributions. *Science* **180**: 1061-1063.

Goldin-Meadow, Susan y Heidi Feldman (1977). The development of language-like communication without a language model. *Science* **197**: 401-403.

Gray, J. A. (1972a). The psychophysiological nature of introversion-extroversion: A modification of Eysenck's theory. En Nebylitsyn y Gray, págs. 182-205, 1972.

Gray, J. A. (1972b). Learning theory, the conceptual nervous system, and personality. En Nebylitsyn y Gray, págs. 372-399, 1972.

Gray Eaton, G. (1976). The social order of the Japanese macaques. *Scientific American* **235**, 4: 96-106.

Griffin, Donald R. (1976). *The Question of Animal Awareness*. Nueva York, Rockefeller University Press.

Gross, Charles G. y H. Philip Zeigler, Eds. (1969). *Readings in Physiological Psychology. Motivation*. Nueva York, Harper & Row.

Haken, H. (1975). Cooperative phenomena in systems far from equilibrium and in nonphysical systems. *Review of Modern Physics* **47**: 67-121.

Hamilton, W. D. (1964). The genetical theory of social behavior. *Journal of Theoretical Biology* **7**: 1-16, 17-32.

Hamilton, W. D. (1971). Geometry of the selfish herd. *Journal of Theoretical Biology* **31**: 295-311.

Harris, Marvin (1968). *The Rise of Anthropological Theory*. Nueva

York, Thomas Y. Crowell Co. [*El desarrollo de la teoría antropológica. Una historia de las teorías de la cultura*. Traducción de R. Valdés del Toro. Madrid, Siglo Veintiuno Editores, 1978].

Harrison, M. A. (1965). *Introduction to Switching and Automata*. Nueva York, Academic Press.

Hebb D. (1949). *The Organization of Behavior*. Nueva York, Wiley.

Hebb D. (1968). *A Textbook of Psychology*. Filadelfia, W. B. Saunders Co.

Hebb D. (1974). What psychology is about. *American Psychologist* **29**: 71-79.

Hegel, G. W. F. (1830). *Encyklopädie der philosophischen Wissenschaften im Grundrisse,* 3ª ed. Heildelberg, Verwaltung des Oswaldschen Verlags.

Henderson, Lawrence J. (1913). *The Fitness of the Environment*. Boston, Beacon Press, 1958.

Hinde, Robert A. (1974). *Biological Bases of Human Social Behaviour*. Nueva York, McGraw Hill.

Holland, John H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbour, University of Michigan Press.

Homans, George C. (1974). *Social Behavior: Its Elementary Forms*. Nueva York, Harcourt, Brace, Jovanovich.

Hubel, D. H. y T. N. Wiesel (1963). Receptive fields and functional architecture of monkey straite cortex. *Journal of Physiology* **165**: 559-568.

Hull, David (1974). *Philosophy of Biological Science*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey, Prentice Hall.

Hume, D. (1739-1740). *A Treatise of Human Nature*. L. A. Selby-Bigge, Ed. Oxford, Clarendon Press.

Jacob, François (1970). *La logique du vivant*. París, Gallimard. [*La lógica de lo viviente*. Traducción de J. Senent y M. R. Soler. Barcelona, Salvat, 1986].

Jacob, François (1977). Evolution and tinkering. *Science* **196**: 1161-1166.

Jost, R. (1965). *The General Theory of Quantized Fields*. Providence, American Mathematical Association.

Kalman, R. E., P. L. Falb y M. A. Arbib (1969). *Topics in Mathematical System Theory*. Nueva York, McGraw-Hill.

Kawai, Masao (1965). Newly acquired pre-cultural behavior of the natural troop of Japanese monkeys on Koshima Islet. *Primates* **6**: 1-30.

Kemeny, John y Paul Oppenheim (1956). On reduction. *Philosophical Studies* **7**: 6-19.

Kendrew, John C. (1966). *The Thread of Life*, 2da ed. Londres, G. Bell & Sons Ltd.

Keosian, John (1968). *The Origin of Life*, 2da ed. Nueva York, Van Nostrand Reinhold Co.

King, M. -C. y A. C. Wilson (1975). Evolution at two levels in humans and chimpanzees. *Science* **188**: 107-116.

Klir, George (1969). *An Approach to General System Theory*. Nueva York, Van Nostrand Reinhold Co.

Klir, George y Miroslav Valach (1967). *Cybernetic Modelling*. Londres, Iliffe Books Ltd.; Praga, SNTL.

Klir, George y Gary Rogers (1977). *Basic and Applied General Systems Research: A Bibliography*. Binghampton, Nueva York, SUNY-Binghampton.

Kripke, Saul (1971). Identity and necessity. En Milton K. Munitz, Ed. *Identity and Individuation*, págs. 135-164, Nueva York, Nueva York University Press.

Krohn, Kenneth, Rudolph Langer and John Rhodes (1967). Algebraic principles for the analysis of a biochemical system. *Journal of Computer and System Sciences* **1**: 119-136.

Küppers, Bernd (1975). The general principles of selection and evolution at the molecular level. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* **30**: 1-22.

Lange, Oscar (1965). *Wholes and Parts: A General Theory of Systems Behavior*. Oxford, Pergamon Press; Varsovia, PWN.

Lehninger, Albert L. (1975). *Biochemistry*, 2da ed. Nueva York, Worth Publishers Inc.

Lepper, M. R., D. Greene y R. E. Nisbett (1973). Undermining children's intrinsic interest with extrinsic rewards. *Journal of Personality and Social Psychology* **28**: 129-137.

Levins, Richard (1968). *Evolution in Changing Environments*. Princeton, Princeton University Press.

Lévi-Strauss, C. (1958). *Structural Anthropology*. Nueva York, Basic Books. [*Antropología estructural*. Traducción de J. Almela. Madrid, Siglo Veintiuno, 1997].

Lewontin, Richard C. (1974). *The Genetic Basis of Evolutionary Change*. Nueva York y Londres, Columbia University Press.

Llinás, Rodolfo y Mario Bunge (1978). Restricted applicability of the concept of command in neuroscience. *Behavioral and Brain Sciences* **1**: 30-31.
Lloyd Morgan C. (1933). *The Emergence of Novelty*. Londres, Williams & Norgate.
Luria, A. R. (1966). *Human Brain and Psychological Processes*. Nueva York, Harper & Row.
Luria, A. R. (1969). Speech development and the formation of mental processes. En Michael Cole e Irving Maltzman, Eds. *A Handbook of Contemporary Soviet Psychology*, págs. 121-162, Nueva York, Basic Books.
Lwoff, André (1962). *Biological Order*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
MacGregor, Ronald J. y Edwin R. Lewis (1977). *Neural Modelling*. Nueva York y Londres, Plenum Press.
Malcolm, Norman (1964). Scientific materialism and the identity theory. *Dialogue* **3**: 115-125.
Malcolm, Norman (1973). Thoughtless brutes. *Proceedings and Adresses of the American Philosophical Association* **46**: 5-20.
Mandl, F. (1959). *Introduction to Quantum Field Theory*. Nueva York, Interscience.
Malsburg, C. von der (1973). Self-organization of orientation sensitive cells in the striate cortex. *Kybernetik* 14: 85-100.
Margolis, Joseph (1978). *Persons and Minds: The Prospects of Nonreductive Materialism*. Dordrecht y Boston, D. Reidel Publ. Co.
Marr, David (1970). A theory for cerebral cortex. *Proceedings of the Royal Society* (Londres) **B176**: 161-234.
Maynard Smith, J. (1968). *Mathematical Ideas in Biology*. Cambridge, Cambridge University Press.
McNaughton, Robert (1961). The theory of automata: a survey. *Advances in Computers* **2**: 379-421.
Menzel, E. W., Jr., R. K. Davenport y C. M. Rogers (1972). Protocultural aspects of chimpanzee's responsiveness to novel objects. *Folia Primatologica* **17**: 161-170.
Mesarović, M. D., Ed. (1964). *Views on General Systems Theory*. Nueva York, Wiley.
Miller, Stanley y Leslie Orgel (1974). *The Origins of Life on the Earth*. Englewood Cliffs, Nueva Jersey, Prentice-Hall.

Miller, Neal E. (1969). Learning of visceral and glandular responses. *Science* **163**: 434-445.
Milsum, John H., Ed. (1968). *Positive Feedback*. Oxford, Pergamon press.
Monod, Jacques (1970). *Le hasard et la nécessité*. París, Ed. du Seuil. Traducción al inglés, *Chance and Necessity*. Nueva York, Knopf, 1971. [*El azar y la necesidad, ensayo sobre la filosofía natural de la biología*. Traducción de F. Lerín Ferrer. Barcelona, Barral, 1971].
Moore, Robert Y. (1976). Synaptogenesis and the morphology of learning and memory. En Rosenzweig y Bennet, Eds., págs. 340-347.
Morris, Charles W. (1938). Foundations of the theory of signs. *International Encyclopaedia of Unified Science*, Vol. I, Nº 2. Chicago, University of Chicago Press.
Mostow, G. D., Ed. (1975). *Mathematical Models for Cell Rearrengement*. New Haven, Connecticut, Yale University Press.
Mountcastle, Vernon (1957). Modality and topographic properties of single neurons of cat's somatic sensory cortex. *Journal of Neurophysiology* **20**: 408-434.
Nass, Menasche M. y Leon N. Cooper (1975). A theory for the development of feature detecting cells in visual cortex. *Biological Cybernetics* **19**: 1-18.
Nebylitsyn, V. D. y A. J. Gray, Eds. (1972). *Biological Bases of Individual Behavior.* Nueva York y Londres, Academic Press.
Neumann, John von (1951). The general and logic theory of automata. En L. A. Jeffress, Ed. *Cerebral Mechanisms in Behavior.* Nueva York, Wiley.
Neumann, John von (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata*. Editado y completado por A. W. Burks. Urbana, University of Illinois Press.
Nicolis, G. e I. Prigogine (1977). *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*. Nueva York, Wiley.
O'Connor, John, Ed. (1969). *Modern Materialism: Readings on the Mind-Body Identity*. Nueva York, Harcourt, Brace & World.
Olby, Robert (1974). *The Path to the Double Helix*. Seattle, University of Washington Press.
Omenn, Gilbert S. y Arno Motulsky (1972). Biochemical genetics and the evolution of human behavior. En L. Ehrman, G. S. Omenn y E. Caspari, Eds. *Genetics, Environment and Behavior*, págs. 129-172. Nueva York, Academic Press.

Oparin, A. (1968) *Genesis and Evolutionary Development of Life*. Nueva York, Academic Press.

Oppenheim, Paul y Hilary Putnam (1958). Unity of science as a working hipothesis. En H. Feigl, G. Maxwell y M. Scriven, Eds. *Minnesotta Studies in the Philosophy of Science*, Vol. II, págs. 3-36. Minneapolis, University of Minnesotta Press.

Oró, J., S. L. Miller, C. Ponnamperuma y R. S. Young, Eds. *Cosmochemical Evolution and the Origin of Life*, I. Dordrecht y Boston, D. Reidel Publ. Co.

Padulo, Louis y Michael A. Arbib (1974). *System Theory*. Filadelfia, W. B. Saunders, Co.

Paivio, A. (1971). *Imagery and Verbal Processes*. Nueva York, Holt, Rienhart & Winston.

Penfield, Wilder (1975). *The Mistery of the Mind: A Critical Study of Consciousness and the Human Brain*. Princeton, Princeton University Press.

Penfield, Wilder y T. Rasmussen (1950). *The Cerebral Cortex of Man*. Nueva York, Macmillan.

Pirie, N. W. (1960). Chemical diversity and the origins of life. En Florkin, Ed. 1960, págs. 55-62.

Polanyi, Michael (1968). Life's irreducible structure. *Science* **160**: 1308-1312.

Popper, Karl R. (1968). Epistemology without a knowing subject. En B. van Rootselaar y J. F. Staal, Eds. *Logic, Methodology and Philosophy of Science* III, págs. 333-373. Ámsterdam, North-Holland. [Epistemología sin sujeto cognoscente. En *Conocimiento objetivo. Un enfoque evolucionista*. Cap. 3. Traducción de C. Solís Santos. Madrid, Tecnos, 1974].

Popper, Karl R. (1972). *Objective Knowledge. An Evolutionary Approach*. Oxford, Clarendon Press. [*Conocimiento objetivo. Un enfoque evolucionista*. Traducción de C. Solís. Madrid, Tecnos, 1974].

Popper, Karl R. (1974). Autobiography. En P. A. Schilpp, Ed. *The Philosophy of Karl R. Popper*, I, págs. 1-181. La Salle, Illinois, Open Court.

Popper, Karl R. y John C. Eccles (1977). *The Self and its Brain*. Berlín, Heidelberg, Londres y Nueva York, Springer International. [*El yo y su cerebro*. Traducción de C. Solís Santos. Barcelona, Labor].

Powell, T. P. S. y Vernon Mountcastle (1959). Some aspects of the functio-

nal organization of the cortex of the postcentral gyrus of the monkey: a correlation of findings obtained in a single unit analysis with cytoarchitecture. *Bulletin of the Johns Hopkins Hospital* 105: 133.

Premack, David (1971). Language in chimpanzees? *Science* **172**: 808-822.

Puccetti, Roland (1977). Sperry on consciousness: A critical apreciation. *Journal of Medicine and Philosophy* **2**: 127-144.

Putnam, H. (1969). On properties. En N. Rescher, Ed., *Essays in Honor of Carl G. Hempel*, págs. 235-254. Dordrecht, D. Reidel Publ. Co.

Rabin, Michael O. (1963). Probabilistic automata. *Information and Control* **6**: 230-245.

Rabin, Michael O. y Dana Scott (1959). Finite automata and their decision problems. *IBM Journal of Research and Development* **3**: 114-125.

Rashevsky, Nicholas (1972). Some remarks on the central nervous system. *Bulletin of Mathematical Biophysics* **34**: 231-242.

Ratcliffe-Brown, A. R. (1935). On the concept of function in social science. *American Anthropologist* **37**: 397-402.

Reynolds, Vernon (1976). *The Biology of Human Action*. Reading y San Francisco, W. H. Freeman & Co. Ltd.

Rosen, Robert (1959). The DNA-protein coding problem. *Bulletin of Mathematical Biophysics* **21**: 71-95.

Rosen, Robert (1970). Subunits and subassebly processes. *Journal of Theoretical Biology* **28**: 415-422.

Rosenblueth, Arturo, Norbert Wiener y Julian Bigelow (1943). Behavior, purpose and teleology. *Philosophy of Science* **10**: 18-24.

Rosenblueth, Arturo y Norbert Wiener (1950). Purposeful and non-purposeful behavior. *Philosophy of Science* **17**: 318-326.

Rosenzweig, Mark y Edward L. Bennett, Eds. (1976). *Neural Mechanisms of Learning and Memory*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press.

Rumbaugh, Duane M., Timothy V. Gill y Ernst von Glasersfeld (1973). Reading and sentence completion by a chimpanzee (*Pan*). *Science* **182**: 731-733.

Ruse, Michael (1979). *Sociobiology: Sense or Nonsense?* Dordrecht y Boston, D. Reidel Publ. Co.

Rutledge, L. T. (1976). Synaptogenesis: effects of synaptic use. En Rosenzweig y Bennett, Eds., 1976, págs. 329-339.

Schlick, Moritz (1925). *Allgemeine Erkenntnislehre*, edición revisada. Traducción al inglés de A. E. Blumberg, General Theory of Knowledge. Viena-Nueva York, Springer-Verlag, 1974.

Sellars, Roy Wood (1922). *Evolutionary Naturalism*. Chicago, Open Court.

Sellers, Peter H. (1967). Algebraic complexes which characterize chemical networks. SIAM *Journal of Applied Mathematics* **15**: 13-68.

Sellers, Peter H. (1970). Combinatorial analysis of a chemical network. SIAM *Journal of the Franklin Institute* **290**: 113-130.

Sellers, Peter H. (1971). An introduction to a mathematical theory of chemical reaction networks I. *Archives for Rational Mechanics and Analysis* **44**: 22-40.

Shaffer, Jerome A. (1977). Personal identity: the implications of brain bisection and brain transplant. *Journal of Medicine and Philosophy* **2**: 147-161.

Smart, J. J. C. (1959). Sensations and brain processes. *Philosophical Review* **68**: 141-156.

Smith, Emil (1970). Evolution of enzymes. En Paul D. Boyer, Ed. *The Enzymes*, Vol. I, págs. 267-339. Nueva York, Academic Press.

Smith, W. John (1965). Message, meaning, and context in ethology. *American Naturalist* **99**: 405-409.

Smythies, J. R., Ed. (1965). *Brain and Mind*. Londres, Routledge & Kegan Paul.

Sommerhoff, Gerd (1974). *Logic of the Living Brain*. Nueva York, Wiley.

Sourkes, Theodore (1962). *Biochemistry of Mental Disease*. Nueva York, Harper & Row.

Spencer, Herbert (1862). *First Principles*. Edición final, Londres, Watts & Co., 1937.

Sperry, Roger W. (1964). Neurology and the mind-body problem. En Robert Isaacson, Ed. *Basic Readings in Neuropsychology*, págs. 403-429. Nueva York, Harper & Row.

Sperry, Roger W. (1966). Bran bisection and mechanisms of consciousness. En John Eccles, Ed. *Brain and Conscious Experience*. Berlín, Heidelberg y Nueva York, Springer-Verlag, 1966.

Sperry, Roger W. (1977). Forebrain commissurotomy and conscious awareness. *Journal of Medicine and Philosophy* **2**: 101-126.

Spinoza, Benedict (1677) *Ethics*. Oxford, Oxford University Press, 1927.

Steinberg, Malcolm S. (1963). Reconstruction of tissues by dissociated cells. *Science* **141**: 401-408.
Thom, René (1972). *Stabilité structurelle et morphogenèse*. Reading, Massachusetts, W. A. Benjamin Inc.
Toulmin, Stephen (1972). The mentality of man's brain. En A. G. Karczmar y John C. Eccles, Eds. *Brain and Human Behavior*, págs. 409-422. Nueva York, Heidelberg y Berlín, Springer-Verlag.
Turing, Alan (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind* **NS59**: 433-460.
Turing, Alan (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society (Londres)* **B237**: 7-94.
Tyson, John J. (1976). *The Belousov-Zhabotinskii Reaction*. Berlín, Heidelberg y Nueva York, Springer-Verlag.
Vaucouleurs, Gérard de (1970). The case for a hierarchical cosmology. *Science* **167**: 1203-1213.
Vesey, G. N. A., Ed. (1964). *Body and Mind*. Londres, George Allen & Unwin.
Vol'kenshtein, Mikhail V. (1970). *Molecules and Life*. Nueva York, Plenum Press.
Vygotski, L. S. (1962). *Thought and Language*. Traducción de E. Hanfman y G. Vakar. Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
Waddington, Conrad Hall (1959). Evolutionary systems – animal and human. *Nature* **183**: 1654-1658.
Wallerstein, Immanuel (1974). *The Modern World-System: Capitalist Agriculture and the Origins of European World Economy in the Sixteenth Century*. Nueva York, Academic Press.
Watson, James (1976). *Molecular Biology of the Gene*, 3ra ed. Menlo Park, California, W. A. Benjamin, Inc.
Wiener, Norbert (1948). *Cybernetics*. Nueva York, John Wiley & Sons.
Williams, George C. (1966). *Adaptation and Natural Selection*. Princeton, Princeton University Press.
Wilson, Edward O. (1975). *Sociobiology: The Modern Synthesis*. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press. [*Sociobiología: la nueva síntesis*. Traducción de R. Navarro y A. de Haro. Barcelona, Omega, 1980].
Wilson, H. R. y J. D. Cowan (1973). A mathematical theory of the functional dynamics of cortical and thalamic nervous tissue. *Kybernetic* **13**: 55-80.

Winch, Peter (1958). *The Idea of a Social Science*. Londres, Routledge & Kegan Paul.

Worden, Frederic G., Judith P. Swazey y George Adelman, Eds. (1975). *The Neurosciences: Paths of Discovery*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press.

Zadeh, Lofti A. y Charles A. Desoer (1963). *Linear System Theory: The State Space Approach*. Nueva York, McGraw-Hill.



Índice de nombres

Índice de materias

Índice de *Ontología I*

